



LAPORAN TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISA PENGARUH KOMPOSISI *GRAPHENE-TiO₂*
TERHADAP UNJUK KERJA *DYE-SENSITIZED SOLAR
CELL (DSSC)***

INDERA CAHYA PRADANA
NRP. 2711 100 053

DOSEN PEMBIMBING
Diah Susanti, S.T.,M.T.,Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2014**

~ halaman ini sengaja dikosongkan ~



FINAL PROJECT - TL141584

**THE ANALYSIS OF GRAPHENE- TiO_2 COMPOSITION
EFFECT ON DYE- SENSITIZED SOLAR CELL
PERFORMANCE**

INDERA CAHYA PRADANA
NRP. 2711 100 053

ADVISOR
Diah Susanti, S.T.,M.T.,Ph.D.

**MATERIALS & METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2014**

~ halaman ini sengaja dikosongkan ~

ANALISA PENGARUH KOMPOSISI GRAPHENE-TiO₂ TERHADAP UNJUK KERJA DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC)

Nama : Indera Cahya Pradana
NRP : 2711 100 053
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi ITS
Dosen Pembimbing : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.

Abstrak

Saat ini, 89,5% pembangkit tenaga listrik di Indonesia menggunakan energi fosil yang tidak dapat diperbaharui. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mencari sumber energi alternatif dengan memanfaatkan energi surya yang dikonversikan menjadi energi listrik menggunakan dye-sensitized solar cell. Material semikonduktor pada fotoelektroda DSSC penelitian ini terdiri dari komposit TiO₂ dengan graphene. Graphene yang dikompositkan merupakan hasil sintesis dengan metode modifikasi Hummer sebagai salah satu komponennya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh komposisi 0; 5; 10 dan 15% wt Graphene pada komposit Graphene- TiO₂ yang terbaik untuk didapatkan efisiensi unjuk kerja yang maksimal. Pada penelitian ini, digunakan dye dari ekstrak bunga Geranium (*Geranium sylvaticum*). Unjuk kerja DSSC pada penelitian ini didasarkan pada efisiensi dan fill factor DSSC. Efisiensi dan Fill Factor terbaik didapatkan pada komposisi 10% wt graphene pada komposit Graphene- TiO₂ dengan nilai efisiensi sebesar 0,00532% dan fill factor sebesar 0,69 (69%).

Kata kunci : dye-sensitized solar cell, graphene, bunga geranium, TiO₂, komposit, unjuk kerja



**ANALISA PENGARUH KOMPOSISI *GRAPHENE-TiO₂*
TERHADAP UNJUK KERJA *DYE-SENSITIZED SOLAR
CELL (DSSC)***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

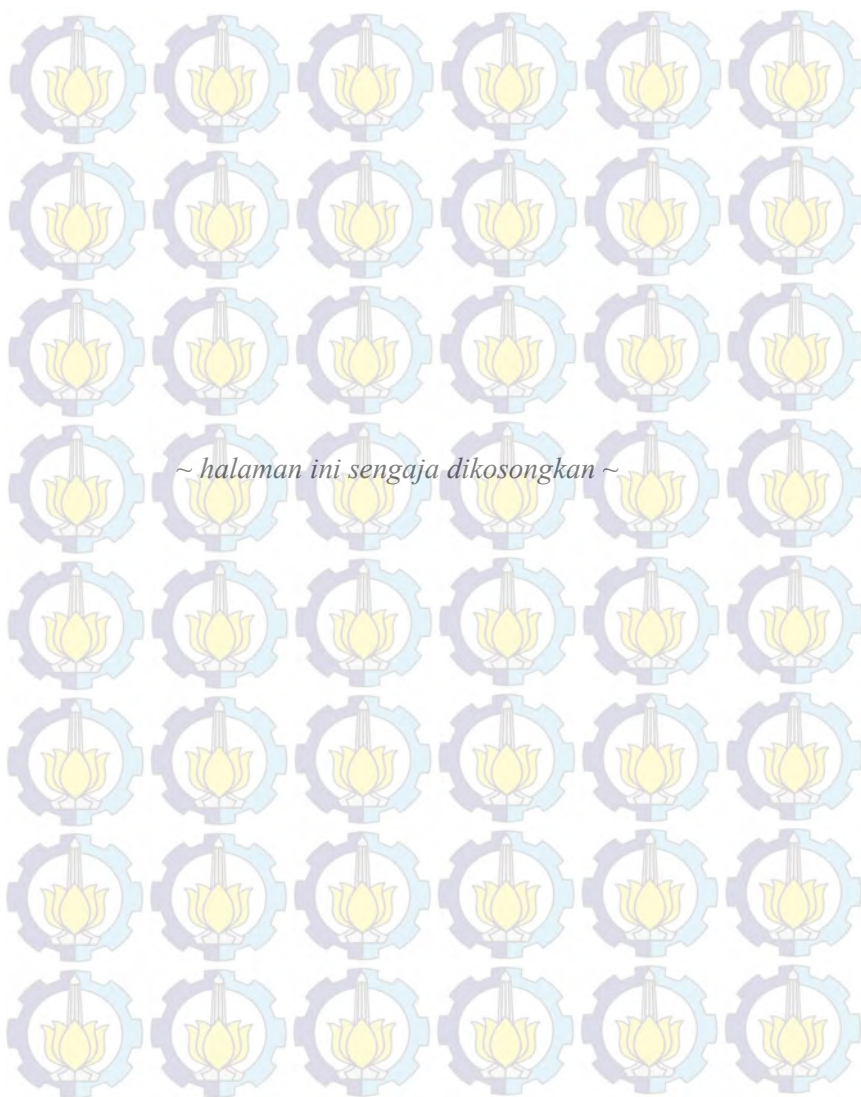
Oleh:

**Indera Cahya Pradana
NRP. 2711 100 053**

Disetujui Oleh:

Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D. (Pembimbing)

**SURABAYA
Januari 2014**



THE ANALYSIS OF GRAPHENE- TiO_2 COMPOSITION EFFECT ON DYE- SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) PERFORMANCE

Name : Indera Cahya Pradana
Student Number: 2711 100 053
Department : Materials and Metallurgical Engineering ITS
Advisor : Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.

Abstract

*Currently, about 89,5% of electric power generator in Indonesia using fossil energy that can't renewable. Therefore, this study was conducted to find alternative energy sources by utilizing solar energy which is converted into electrical energy using a dye-sensitized solar cell. DSSC photoelectrode semiconductor material in this study consisted of a TiO_2 with graphene composite. Graphene in this study, was synthesized by a modified Hummer's method. This study aimed to analyze the influence of 0; 5; 10 and 15 wt% graphene composition in a TiO_2 - graphene composite to obtain maximum performance of DSSC. In this study, the extract of Germanium flower (*Germanium sylvaticum*) was used for dye in a DSSC. The performance of the DSSC in this study is based on efficiency and fill factor DSSC. The Best Fill Factor and Efficiency obtained on the composition of 10 wt% graphene in a TiO_2 - Graphene composite with a value of efficiency 0.00532% and fill factor of 0.69 (69%).*

Keywords: *dye-sensitized solar cell, graphene, Geranium sylvaticum, TiO_2 , composite, performance*



~ halaman ini sengaja dikosongkan ~

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT., atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul: **“Analisa Pengaruh Komposisi *Graphene-TiO₂* Terhadap Unjuk Kerja *Dye-sensitized Solar Cell (DSSC)*”** untuk memenuhi syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dengan bantuan banyak pihak, tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT., atas rahmat, hidayah dan berbagai kemudahan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
2. Ibu, Bapak dan keluarga atas segala doa, dukungan dan pengertian yang telah diberikan selama ini.
3. Dosen pembimbing tugas akhir, Ibu Diah Susanti, S.T., M.T., Ph.D.
4. Bapak Sungging Pintowantoro, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.
5. Bapak Ir. Mohammad Farid, DEA, selaku dosen wali penulis.
6. Tim penguji seminar dan siding tugas akhir
7. Teman-teman MT 13, anggota Lab. Kimia Material
8. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

Penyusun menyadari bahwa penyusunan laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran dan kritik yang membangun kepada penulis diharapkan. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Amin.

Surabaya, Januari 2014

Penulis



~ halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya	5
2.2 Sel Surya	6
2.3 <i>Dye Sensitized Solar Cell</i> (DSSC).....	12
2.4 Metode <i>Hydrothermal</i>	20
2.5 Metode <i>Spin Coating</i>	21
2.6 Proses Kalsinasi.....	23
2.7 <i>Graphene</i>	24
2.8 Sifat <i>Graphene</i>	25
2.9 Grafit Oksida	32
2.10 Proses Oksidasi.....	33
2.11 Proses Reduksi	36
2.12 Kompositisasi TiO_2 dengan <i>Graphene</i> pada DSSC	38
2.13 Hasil Penelitian Sebelumnya	40

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan- bahan Penelitian	45
3.2 Alat- alat Penelitian	45
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	48
3.4 Prosedur Penelitian.....	53
3.5 Pengujian.....	62

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengukuran Spektrofotometri UV-Vis.....	73
---	----

4.2 Hasil X-ray Diffractometry (XRD)	77
4.3 Hasil Pengamatan SEM	81
4.4 Hasil Pengukuran Sifat Kelistrikan DSSC	86

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	93
5.2 Saran	93

DAFTAR PUSTAKA.....xxi

LAMPIRANxxv

UCAPAN TERIMA KASIHlxix

BIODATA PENULISlxxiii

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Metode Oksidasi Grafit menjadi GO.....	34
Tabel 2.2	Penelitian Sebelumnya Terkait DSSC dan Sintesa Graphene.....	40
Tabel 3.1	Informasi yang terkandung dalam karakter tinggi, posisi serta lebar dan bentuk puncak difraksi.....	64
Tabel 4.1	Panjang Gelombang dan Absorbansi Puncak Spektrum UV- Vis Untuk Beberapa Kandidat Dye.....	74
Tabel 4.2	Nilai Panjang Gelombang dan Absorbansi Pada Puncak Spektrum UV- Vis Bunga Geranium.....	76
Tabel 4.3	Perbandingan Panjang Gelombang dan Absorbansi Puncak Kedua Pada Berbagai Kandidat Dye.....	76
Tabel 4.4	Data Puncak Tertinggi Untuk Material Grafit, Grafit Oksida dan Graphene.....	78
Tabel 4.5	<i>Photovoltaics Properties</i> DSSC dengan Berbagai Komposisi <i>Graphene</i> dalam TiO_2	89
Tabel 4.6	Perbandingan Efisiensi Berbagai Jenis DSSC.....	89



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Spektrum gelombang elektromagnetik.....	5
Gambar 2.2	Struktur kristal silikon pada sel surya (a) Silikon kristal tunggal, (b) Silikon polikristalin, (c) Silikon amorf.....	6
Gambar 2.3	Pita energi elektron suatu material (a) Material isolator, (b) Material semikonduktor, (c) Material konduktor.....	7
Gambar 2.4	Diagram pengklasifikasian jenis sel surya.....	8
Gambar 2.5	Struktur sel surya berbasis silikon secara umum.....	10
Gambar 2.6	Kurva arus dan tegangan sel surya.....	11
Gambar 2.7	Prinsip dasar fotoelektrokimia pada DSSC.....	13
Gambar 2.8	Perbandingan pita valensi fasa TiO_2	17
Gambar 2.9	Struktur kimia <i>dye anthocyanin</i>	18
Gambar 2.10	Bunga Geranium.....	19
Gambar 2.11	<i>Spin coating</i>	22
Gambar 2.12	Tahapan <i>spin coating</i>	22
Gambar 2.13	Bentuk Karbon berikatan sp^3 (a) Grafit (b) <i>Graphene</i> (c) <i>CNTs</i> (d) <i>Fullerene</i>	24
Gambar 2.14	Struktur <i>Graphene</i> yang tersusun atas Dua Atom Non-equivalen.....	25
Gambar 2.15	(a) Susunan Ikatan σ dan Ikatan π pada Struktur <i>Graphene</i> (b) Orbital $2p_z$ membentuk Dua Pita π Simetris pada Ujung Zona Brillouin Pertama.....	26
Gambar 2.16	Pertemuan Pita Konduksi dan Pita Valensi pada <i>K</i> dan <i>K'</i>	27
Gambar 2.17	Efek Medan Listrik Ambipolar pada <i>Graphene</i>	28
Gambar 2.18	QHE <i>graphene</i> pada temperatur ruang (a) <i>Hall Conductivity</i> (b) <i>Hall Resistance</i>	29
Gambar 2.19	Profil Intensitas Transmisi Sinar Putih terhadap Sinar kuning melalui <i>Graphene Flakes</i>	31
Gambar 2.20	Model struktur GO.....	33
Gambar 2.21	Skema Modifikasi Metode Hummer.....	36
Gambar 3.1	Diagram Alir Pembuatan Grafit Oksida.....	48
Gambar 3.2	Diagram Alir Sintesis <i>Graphene</i>	49
Gambar 3.3	Diagram Alir Preparasi <i>Dye</i> DSSC.....	50
Gambar 3.4	Diagram Alir Preparasi Fotoelektroda.....	51
Gambar 3.5	Diagram Alir Proses Perakitan DSSC.....	52
Gambar 3.6	Diagram Alir Proses Pengujian DSSC.....	53
Gambar 3.7	Skema <i>Ice Bath</i> pada Proses <i>Stirring</i>	54

Gambar 3.8	Proses <i>Stirring</i> pada Sintesis Grafit Oksida dengan Temperatur 35° C Selama 24 Jam.....	54
Gambar 3.9	Perbedaan Warna (a) Sebelum dan (b) Sesudah Penambahan H ₂ O ₂	55
Gambar 3.10	Titrasi dengan Larutan BaCl ₂ untuk mengetahui (a) ada atau (b) tidaknya sisa SO ₄ ²⁻	56
Gambar 3.11	Grafit Oksida Dalam Sebuah Crucible (a) Sebelum <i>Drying</i> dan (b) Sesudah <i>Drying</i>	56
Gambar 3.12	(a) Satu Set <i>Autoclave</i> yang digunakan dalam Proses <i>Hydrothermal</i> (b) Larutan <i>Graphene Oxide</i> dimasukkan ke dalam Teflon dari <i>Autoclave</i> (c) <i>Autoclave</i> dimasukkan ke dalam muffle furnace.....	57
Gambar 3.13	Serpihan <i>Graphene</i> Hasil <i>Hydrothermal</i>	58
Gambar 3.14	Proses Penghalusan Bunga <i>Geranium</i> Menggunakan <i>Blender</i> untuk proses ekstraksinya sebagai <i>dye</i>	59
Gambar 3.15	Salah Satu <i>Dye</i> Yang Di Buat dari Ekstrak Bunga <i>Geranium</i>	59
Gambar 3.16	Deposisi Pasta TiO ₂ pada Permukaan Kaca FTO Menggunakan <i>Spin Coater</i>	60
Gambar 3.17	Hasil Kalsinasi Bagian Fotoelektroda DSSC dengan komposisi <i>graphene</i> (a) 0%, (b) 5% (c)10% dan (d) 15%.....	60
Gambar 3.18	Proses Sensitisasi <i>Layer</i> TiO ₂ dengan berbagai komposisi persentase <i>graphene</i> dalam larutan <i>dye</i>	61
Gambar 3.19	(a) Skema kerja SEM (b) <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) Inspect S50.....	63
Gambar 3.20	(a) Instrumen XRD PANalytical (b) Pola Difraksi Sinar-x.....	64
Gambar 3.21	Efek Ukuran Kristal Pada Difraksi Sinar-X.....	65
Gambar 3.22	Mesin UV- Vis Genesys 10S UV- Vis Spectrometer.....	66
Gambar 3.23	Skema Spektrofotometer UV-VIS.....	67
Gambar 3.24	Rangkaian Instrumen Pengujian <i>Keithley 2606A i-V Measurement</i>	69
Gambar 3.25	DSSC Diuji Kelistrikananya Dengan <i>Keithley i-V measurement</i>	69
Gambar 3.26	Karakteristik I-V pada DSSC saat kondisi <i>dark</i> dan <i>illuminated</i>	70
Gambar 4.1	Grafik Absorbansi Untuk Berbagai Kandidat <i>Dye</i>	74
Gambar 4.2	Spektrum Absorbansi UV- Vis <i>Dye</i> Ekstrak Bunga <i>Geranium</i>	76

Gambar 4.3	Hasil XRD untuk Grafit, Grafit Oksida, dan <i>Graphene</i> ,.....	78
Gambar 4.4	Hasil XRD untuk TiO ₂ - 0% <i>Graphene</i> , 5% <i>Graphene</i> , 10% <i>Graphene</i> , dan 15% <i>Graphene</i>	80
Gambar 4.5	Morfologi Grafit Diamati dengan SEM Perbesaran 5000x,.....	82
Gambar 4.6	Morfologi Grafit Oksida Diamati dengan SEM Perbesaran 5000x,.....	82
Gambar 4.7	Morfologi grafit <i>graphene</i> diamati dengan SEM perbesaran 5000x,.....	83
Gambar 4.8	Lembaran Tebal dan Tipis pada <i>Graphene</i> Diamati dengan SEM Menggunakan Perbesaran 5000x,.....	84
Gambar 4.9	Morfologi <i>Cross-sectional</i> DSSC (a) 0%, (b) 5% , (c) 10%, (d) 15%.....	85
Gambar 4.10	Plot Kurva J-V untuk 0% <i>Graphene</i>	86
Gambar 4.11	Plot Kurva J-V untuk 5% <i>Graphene</i>	87
Gambar 4.12	Morfologi Grafit Oksida Diamati dengan SEM Perbesaran 5000x,.....	87
Gambar 4.13	Morfologi Grafit Oksida Diamati dengan SEM Perbesaran 5000x,.....	88
Gambar 4.14	Perbandingan Kurva Untuk Keempat Variasi.....	88
Gambar 4.15	Tren Penambahan <i>Graphene</i> terhadap Efisiensi pada DSSC.....	90





BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu tantangan yang dihadapi oleh manusia pada saat ini adalah masalah persediaan energi. Peningkatan populasi penduduk di bumi menyebabkan kebutuhan energi akan menjadi masalah yang sangat penting untuk 50 tahun ke depan. Saat ini, 89,5% pembangkit tenaga listrik di Indonesia menggunakan energi fosil (Rohi, 2008). Dampak penggunaan energi fosil salah satunya adalah menghasilkan emisi gas buang yang cukup besar, sebagai misal setiap kWh energi listrik yang diproduksi oleh energi fosil menghasilkan polutan yang dibuang keudara 974 gr CO₂, 962 mg SO₂ dan 700 mg NO_x. Pada tahun 2012 diperkirakan produksi energi listrik di Indonesia mencapai 192,590 GWh, berarti 172,360GWh listrik yang diproduksi menggunakan energi fosil. Jumlah ini mengakibatkan terjadi pelepasan 168 juta ton CO₂, 159,6 ribu ton SO₂ serta 120,7 ribu ton NO_x ke udara. (Rohi 2008). Selain itu, ketersediaan cadangan bahan bakar fosil juga semakin menipis. Sehingga, terjadi pergeseran dari penggunaan sumber energi tak terbarukan ke sumber energi alternatif yang murah, tersedia dalam jumlah yang tak terbatas, ramah lingkungan, dan mempunyai potensi energi yang sangat besar untuk membantu mengurangi krisis energi.

Indonesia, sebagai negara yang beriklim tropis, salah satu energi alternatif yang mempunyai potensi adalah sinar matahari. Energi sinar matahari yang diterima oleh bumi sebenarnya hanya 69% dari total energi yang dipancarkan matahari. Energi yang diterima yaitu sebesar 3×10^{24} J per tahun, setara dengan 2×10^{17} W atau sepuluh ribu kali konsumsi energi di seluruh dunia saat ini. Dengan kata lain, dengan menutup 0,1% bagian bumi dengan perangkat sel surya dengan efisiensi 10% saja, kita mampu untuk menutupi kebutuhan energi di seluruh dunia (Yuliarto, 2006).

Berbagai penelitian terus dilakukan seiring berjalannya waktu untuk menemukan teknologi yang efektif



dan efisien untuk memanfaatkan energi matahari. Salah satunya dengan penggunaan sel surya (*solar cell*) yang sudah mulai digunakan oleh negara-negara maju dan berkembang. Pengembangan teknologi sel surya ini sudah mengalami peningkatan, mulai dari sel surya silikon, sampai sel surya tingkat lanjut, yaitu *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).

Dye Sensitized Solar Cell atau yang biasa disingkat dengan DSSC, merupakan salah satu kandidat potensial sel surya generasi mendatang. Hal ini dikarenakan tidak memerlukan material dengan kemurnian tinggi sehingga biaya proses produksinya yang relatif rendah. Berbeda dengan sel surya konvensional yang semua proses melibatkan material silikon itu sendiri, pada DSSC absorpsi cahaya dilakukan oleh molekul *dye* dan separasi muatan oleh inorganik semikonduktor nanokristal yang mempunyai *bandgap* lebar.

Salah satu semikonduktor dengan band gap lebar yang sering digunakan yaitu Titanium Dioxide (TiO_2). TiO_2 mempunyai selisih band gap sebesar 3,2 eV, dengan rentang - 1,2 eV sampai 2,0 eV. TiO_2 juga merupakan bahan yang *inert*, tidak berbahaya, dan murah, serta mempunyai karakteristik optik yang baik. Dalam aplikasinya sebagai material semikonduktor pada DSSC, TiO_2 memiliki kelebihan antara lain: indeks refraksi yang tinggi, dan kemampuan menyerap cahaya ultraviolet yang baik (Gong dan Liu, 2012). Namun demikian, efisiensi yang dihasilkan dari DSSC yang menggunakan material semikonduktor TiO_2 masih belum optimal, yaitu sebesar 0.0383409% dengan *dye* berupa ekstrak buah Naga (Nadeak, 2012) dan sebesar 0.0469% dengan *dye* berupa ekstrak buah Terung Belanda (Nafi, 2013).

Dalam perakitan sebuah DSSC yang baik sangat penting juga untuk mempertimbangkan penggunaan bahan *dye* yang mampu menyerap spektrum cahaya yang lebar dan cocok dengan pita energi TiO_2 . Sejauh ini *dye* yang digunakan sebagai *sensitizer* dapat berupa *dye* sintesis maupun *dye* alami. *Dye* sintesis umumnya menggunakan organik logam berbasis *ruthenium* kompleks. Namun sayangnya, jenis tersebut memiliki kekurangan yaitu harganya yang relatif mahal. Selain



itu, *dye* berbasis ruthenium kompleks mengandung logam berat, yang sangat tidak baik untuk lingkungan (Wongcharee, 2007). Sedangkan *dye* alami dapat diekstrak dari bagian-bagian tumbuhan seperti daun, bunga atau buah. Berbagai jenis ekstrak tumbuhan telah digunakan sebagai *photosensitizer* pada sistem sel surya tersensitisasi *dye*. Ekstrak *dye* atau pigmen tumbuhan yang digunakan sebagai *photosensitizer* berupa ekstrak klorofil, karoten, atau antosianin (Maddu, 2007).

Karena keterbatasan- keterbatasan tersebutlah, maka timbul alternatif dalam penelitian ini yaitu membuat *prototype* DSSC dengan material semikonduktor berupa komposit *Graphene-TiO₂*. Harapannya, DSSC dapat mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik, serta mempunyai nilai kelistrikan yang lebih tinggi dari penelitian sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini, masalah yang hendak dipecahkan antara lain sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh persentase massa *graphene* pada komposisi material komposit *Graphene-TiO₂* sebagai material semikonduktor yang digunakan dalam pembuatan DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*) terhadap unjuk kerja DSSC (*Dye Sensitized Solar Cell*)?
2. Bagaimanakah proses pembuatan *prototype* DSSC dalam skala laboratorium untuk mengkonversi secara maksimal energi cahaya matahari menjadi energi listrik?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan agar penelitian yang dilakukan lebih terarah adalah sebagai berikut:

1. pH dan konsentrasi larutan *dye* dianggap konstan.
2. Kecepatan spin coating *TiO₂* yang dilapiskan pada kaca FTO menggunakan konstan
3. Temperatur *holding* pada proses kalsinasi dianggap tetap.
4. Pengotor serbuk grafit, *TiO₂* dan Zn diabaikan

5. Ukuran serbuk Grafit, bahan sintesa *Graphene*
6. Kecepatan *stirring* dari *magnetic stirrer* pada saat sintesis *graphene* dianggap konstan

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan *prototype* DSSC yang dapat mengkonversi secara maksimal energi sinar matahari menjadi energi listrik dengan variasi komposisi material komposit *Graphene-TiO₂* sebagai material semikonduktor, dengan menggunakan larutan *dye* dari ekstrak bunga Geranium.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini diharapkan diperoleh jenis bahan *dye* organik yang tepat dan komposisi material komposit *Graphene-TiO₂* sebagai material semikonduktor, sehingga dihasilkan *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) dengan efisiensi yang maksimal dalam skala laboratorium.

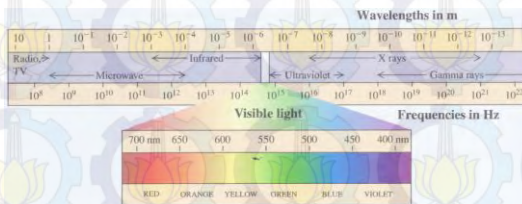
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya

Energi surya merupakan sumber energi yang tidak akan habis dan berpotensi memenuhi sebagian besar energi masa depan dengan konsekuensi minimal yang merugikan lingkungan (Kreith, 1978). Sinar matahari menyediakan sumber energi yang bersih, dapat diperbaharui, dan murah, selain itu juga berperan sebagai sumber energi utama untuk sumber energi yang lain seperti air, *bio*-energi, angin, dan bahan bakar fosil (Omar dan Abdullah, 2013). Ini mengindikasikan bahwa energi surya merupakan energi paling menjanjikan sebagai sumber energi alternatif.

Energi matahari yang dipancarkan ke bumi berupa spektrum gelombang elektromagnetik. Spektrum gelombang elektromagnetik tersebut terdiri dari sinar tampak dan sinar tidak tampak. Sinar tampak dengan panjang gelombang antara 400 nm – 700 nm meliputi warna merah, oranye, kuning, hijau, biru, dan ungu. Sedangkan sinar tak tampak meliputi gelombang radio/tv, microwave, infra merah, ultraviolet, sinar-X, dan sinar gama. Gambar 2.1 menunjukkan spektrum gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari.

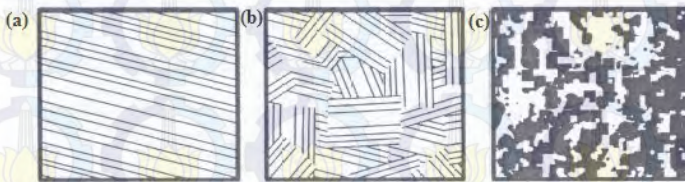


Gambar 2.1 Spektrum gelombang elektromagnetik
(Young and Freedman, 2008)

2.2 Sel Surya

2.2.1 Pengertian Umum

Sel surya, disebut juga fotovoltatik, atau dalam bahasa Inggris disebut *solar cell*, yaitu sebuah perangkat yang dapat mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi energi listrik. Sel surya silikon sampai sekarang mendominasi pasar sel surya dengan pangsa pasar sekitar 82% dan efisiensi lab dan komersil berturut-turut, yaitu 24,7% dan 15% (Goetzberger, 2005). Adapun jenis sel surya silikon berdasarkan jenis struktur kristal silikon-nya antara lain sebagai berikut:



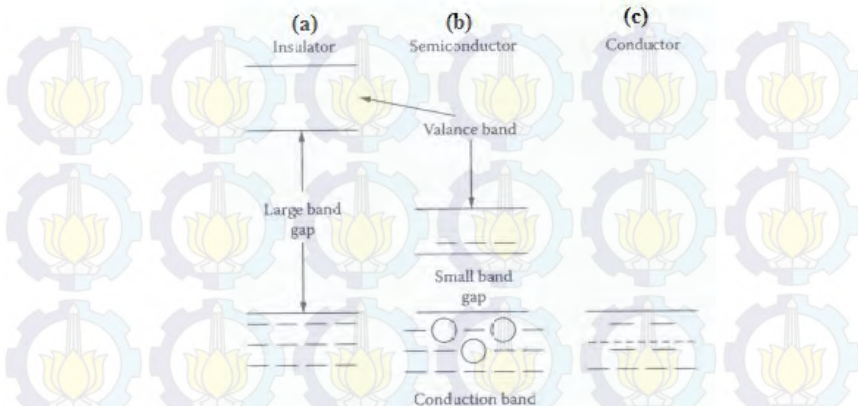
Gambar 2.2 Struktur kristal silikon pada sel surya (a) Silikon kristal tunggal, (b) Silikon polikristalin, (c) Silikon amorf (Foster, Ghassemi, dan Cota, 2010)

Di antara sekian jenis sel surya berbahan Silikon, jenis yang menggunakan Silikon kristal tunggal merupakan yang paling efisien karena kristal ini tidak ada batas butir.

2.2.2 Pita Energi Material Semikonduktor

Sel surya menggunakan bahan semikonduktor sebagai penghantar elektron bebas. Material semikonduktor yaitu suatu padatan (*solid*) dan seperti logam, konduktivitas listriknya ditentukan juga oleh elektron valensinya (Goetzberger, 2005). Yang dimaksud dengan material semikonduktor yaitu bahan dengan konduktivitas listrik yang berada diantara konduktor dan isolator. Perbedaan yang menonjol antara logam dengan material semikonduktor adalah pada sifat konduktivitas listriknya. Konduktivitas listrik logam menurun seiring dengan kenaikan temperatur, sedangkan pada material semikonduktor, seiring dengan kenaikan temperatur konduktivitas listriknya

meningkat. Adapun perbandingan pita energi material semikonduktor dengan material lain adalah sebagai berikut:



Gambar 2.3 Pita energi elektron pada Material (a) isolator, (b) semikonduktor, (c) konduktor (Foster, Ghassemi, dan Cota, 2010)

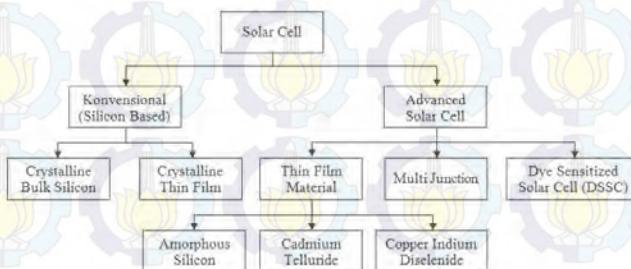
Dari gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa semua pita energi pada material isolator terisi penuh atau sama sekali kosong, sehingga tidak terjadi konduksi listrik. Energi gap cukup besar, sehingga elektron dari pita energi yang penuh tidak dapat tereksitasi (karena energi termal) ke pita energi kosong. Sementara untuk pita energi konduktor, tingkat energi fermi yang melalui pita energi diperkenankan, sehingga pita konduksi setengahnya atau sebagian terisi elektron. Ada sebagian elektron di atas energi fermi dengan meninggalkan elektron *state* yang kosong di bawah energi fermi, konduksi terjadi karena elektron.

Pita energi semikonduktor mempunyai pita energi yang sama sekali penuh dan di atasnya terdapat pita energi yang sama sekali kosong dengan celah (*band gap*) yang tidak terlalu besar, sehingga elektron dapat melompati celah energi *band gap*. Karena ada elektron yang melompat tersebut, maka terdapat elektron di pita konduksi yang kosong, sedangkan elektron yang melompat itu juga menciptakan kekosongan elektron pada pita energi yang berada di bawahnya. Jadi

pembawa muatannya adalah elektron dan *hole*, semakin tinggi temperaturnya, semakin banyak elektron yang melampaui *band gap*, sehingga konduktivitasnya semakin meningkat. Hal ini merupakan salah satu ciri utama semikonduktor.

2.2.3 Klasifikasi Sel Surya

Sel surya menurut Handini (2008), secara umum diklasifikasikan sebagai sel surya sederhana (*conventional/silicon based*) dan sel surya yang terus dikembangkan (*advanced*). Klasifikasi sel surya secara detail dapat dilihat pada diagram sebagai berikut:



Gambar 2.4 Diagram klasifikasi jenis sel surya (Handini, 2008).

Sel surya konvensional, merupakan sel surya dengan bahan penyusun utama silikon. Sel surya jenis ini adalah sel surya yang paling berhasil dikembangkan dan dikomersialkan. Silikon kristal tunggal menghasilkan efisiensi sebesar 15 – 20%, silikon polikristalin 13 – 15%, sedangkan untuk silikon amorf menghasilkan efisiensi sebesar 5 – 10%. Saat ini, *Silicon Based Solar Cell* masih mendominasi hingga 82% dari pasar sel surya di seluruh dunia. Kekurangan dari sel surya berbasis silikon ini adalah biaya produksi *silicon wafer* yang sangat tinggi. Hal ini dikarenakan, untuk mendapatkan performa sel surya yang baik dibutuhkan silikon dengan kemurnian yang sangat tinggi, yaitu di atas 99,9%.

Advanced Solar Cell, yaitu sel surya non-silikon yang sampai saat ini berhasil dikembangkan antara lain sel



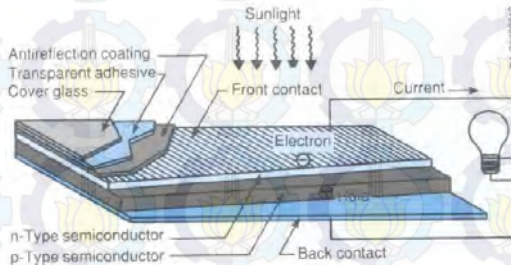
surya berbasis lapisan tipis atau thin film solar cell, sel surya organik dan polimer, serta *dye sensitized solar cell*. *Advanced Solar Cell* tidak hanya pengembangan sel surya non-silikon, namun juga pengembangan sel surya dengan konsep baru yang berbeda dari sel surya konvensional. Beberapa alasan dan konsep dasar dikembangkan *Advanced Solar Cell* adalah:

- Meningkatkan efisiensi, dengan cara:
 - *Thermodynamic*, besarnya energi yang diterima dan energi yang diserap
 - *Detailed Balance*, menyeimbangkan perbedaan *flux* partikel
- Meminimalisasi biaya, dengan cara:
 - Menggunakan bahan dasar yang lebih murah, sedikit, dan efisien
 - Sistem manufaktur yang lebih murah (Handini, 2008).

2.2.4 Struktur Sel Surya Berbasis Silikon

Sel surya memiliki struktur yang terdiri dari daerah positif dan daerah negatif, yang memiliki satu atau lebih jenis material semikonduktor. Dua sisi ini berfungsi sebagai elektroda. Untuk menghasilkan dua daerah bermuatan yang berbeda, maka digunakan *dopant* dengan golongan periodik yang berbeda, agar *dopant* pada daerah negatif berfungsi sebagai pendonor elektron, sedangkan *dopant* pada daerah positif berfungsi sebagai *acceptor* elektron (Goetzberger, 2005). Contoh produk sel surya dengan struktur tersebut adalah sel surya yang menggunakan silikon atau germanium, yang merupakan semikonduktor Golongan IV. Pada sel surya tersebut salah satu sisinya diberi *dopant* yang merupakan unsur dari Golongan V untuk menghasilkan dua muatan yang berbeda, misalnya Arsenik atau Antimoni yang memiliki elektron valensi lima, yang dapat membuat silikon atau germanium tersebut memiliki kelebihan elektron (*n-type*). Selain itu, pada sisi yang berlainan digunakan *dopant* unsur dari Golongan III yang mengakibatkan silikon kekurangan elektron (*p-type*). Penggunaan *dopant* unsur dari Golongan III tersebut dimaksudkan untuk membentuk suatu struktur yang

stabil dibutuhkan empat elektron, maka kekurangan satu elektron dapat diperoleh dari donor *n-type* (Goetzberger, 2005). Pada sel surya juga terdapat lapisan antirefleksi, dan substrat logam sebagai tempat mengalirnya arus dari lapisan tipe-n (elektron) dan tipe-p (*hole*). Adapun ilustrasi dari susunan sel surya tersebut sebagai berikut:



Gambar 2.5 Struktur sel surya berbasis silikon secara umum
(Sumber: *Solar Energy - Renewable Energy and The Environment*, 2010)

2.2.5 Mekanisme Konversi Energi Sel Surya Berbasis Silikon

Mekanisme konversi energi matahari menjadi energi listrik diawali pada saat foton suatu sumber cahaya menumbuk elektron valensi dari atom atau semikonduktor terjadilah tumbukan energi yang cukup besar. Tumbukan energi tersebut mengakibatkan terpisahnya elektron, sehingga terlepas dari struktur atomnya. Elektron tersebut menjadi bebas bergerak dalam bidang kristal, dan menjadi bermuatan negatif dan berada pada daerah pita konduksi material semikonduktor.

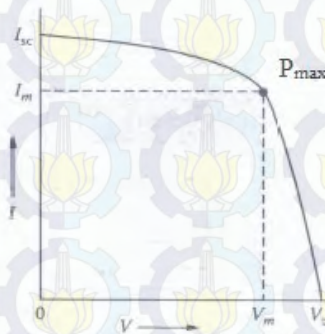
Hilangnya elektron mengakibatkan terbentuknya kekosongan pada struktur kristal yang disebut *hole* dan bermuatan positif. Daerah semikonduktor dengan elektron bebas dan bersifat negatif, bertindak sebagai donor elektron, disebut dengan *negative type (n-type)*. Dan daerah semikonduktor dengan *hole* dan bersifat positif, bertindak sebagai *acceptor* elektron, disebut dengan *positive type (p-type)*.

Ikatan kedua sisi *positive-negative* (*p-n junction*) menghasilkan energi listrik internal yang mendorong elektron bebas dan *hole* untuk saling bergerak ke arah yang berlawanan. Elektron bergerak menjauhi sisi negatif, *hole* bergerak menjauhi sisi positif. Dan ketika ikatan ini dihubungkan dengan sebuah beban, maka timbul arus listrik.

2.2.6 Unjuk Kerja Sel Surya

Daya listrik yang dihasilkan sel surya ketika mendapat cahaya diperoleh dari kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi tegangan ketika diberi beban dan arus melalui beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini ditunjukkan dalam kurva arus-tegangan pada Gambar 2.5.

Ketika sel dalam kondisi *short circuit*, arus maksimal atau arus *short circuit* (I_{sc}) dihasilkan, sedangkan pada kondisi *open circuit* tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimal, disebut dengan tegangan *open circuit* (V_{oc}).



Gambar 2.6 Kurva arus dan tegangan sel surya
(Sumber: Solar Energy - Renewable Energy and The Environment, 2010)

Titik pada kurva arus dan tegangan yang menghasilkan arus dan tegangan maksimal disebut dengan



titik daya maksimal (P_{\max}). Daya maksimal yang dihasilkan oleh sel surya dirumuskan pada Persamaan (2.1).

$$P_{\max} = I_{\max} \times V_{\max} \quad (2.1)$$

Sehingga efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel surya (P_{\max}) dibagi dengan daya dari cahaya yang masuk (P_{in}) dirumuskan pada Persamaan (2.2).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \quad (2.2)$$

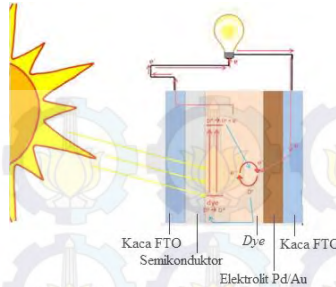
Nilai efisiensi ini yang menjadi ukuran global dalam menentukan kualitas performansi suatu sel surya (Septina, 2007).

2.3 Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)

2.3.1 Prinsip Dasar

Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) yang ditemukan oleh Profesor Michael Gratzel pada tahun 1991, telah menjadi bahan penelitian yang terus dilakukan secara intensif oleh para peneliti di seluruh dunia. Bahan DSSC disebut juga sebagai terobosan pertama dalam teknologi sel surya sejak sel surya silikon (Phani dkk, 2001).

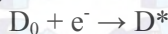
DSSC mengkonversi energi cahaya ke energi listrik dalam skala molekular. Prinsip kerjanya berdasarkan proses *photoelectrochemical*. Dengan kata lain menggunakan prinsip fotosintesis atau elektrokimia sederhana (Gratzel, 1998). Prinsip dasar DSSC yaitu berdasarkan proses fotoelektrokimia yang dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Prinsip dasar fotoelektrokimia pada DSSC

Cara kerja DSSC ini dimulai ketika cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel, diserap oleh larutan pewarna (*dye*) yang sensitif terhadap cahaya matahari (disebut pula dengan *photosensitizer*) yang merupakan jantung dari DSSC (lihat Gambar 2.4). Akibat terserapnya energi cahaya matahari ini, elektron (e^-) dari pewarna dapat tereksitasi atau “terlepas” menuju ke lapisan TiO_2 - *graphene* yang terus kemudian dialirkan ke kabel melalui lapisan tipis FTO. Sedangkan, kehilangan elektron pada larutan pewarna dikompensasikan oleh adanya donasi elektron dari larutan elektrolit iodin melalui reaksi reduksi-oksidasi (redoks).

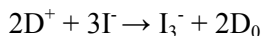
Pada dasarnya prinsip kerja dari DSSC merupakan reaksi dari transfer elektron. Proses pertama dimulai dengan terjadinya eksitasi elektron pada molekul *dye* akibat absorpsi foton. Elektron tereksitasi dari ground state (D_0) ke excited state (D^*).



Elektron kemudian langsung terinjeksi menuju *conduction band* TiO_2 sehingga molekul *dye* teroksidasi (D^+).

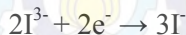


Elektron yang telah dialirkan melalui rangkaian eksternal, kembali menuju FTO yang terlapis counter electrode. *Counter electrode* mempercepat reaksi redoks yang terjadi pada larutan elektrolit. Reaksi yang terjadi yaitu:

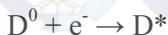




Reaksi reduksi membuat larutan *dye* yang telah digunakan kembali pada *ground state*, sehingga molekul *dye* dapat digunakan kembali. Sedangkan, reaksi oksidasi membuat ion I^- menjadi I^{3-} . Pada larutan elektrolit, terjadi juga reaksi reduksi yang lain, dimana ion I^{3-} akan kembali menjadi I^- , sehingga dapat mendonor elektron agar bisa kembali tereksitasi, sehingga terjadi siklus transport elektron. Reaksi reduksi triiodida yang dimaksud yaitu:



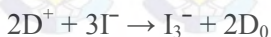
Akibat adanya siklus transport elektron, maka terjadilah proses konversi energi dari sinar matahari menjadi energi listrik. Pada dasarnya, prinsip kerja dari DSSC merupakan reaksi dari transfer elektron. Proses pertama dimulai dengan terjadinya eksitasi elektron pada molekul *dye* akibat absorpsi foton. Elektron tereksitasi dari *ground state* (D^0) ke *excited state* (D^*).



Elektron kemudian langsung terinjeksi menuju *conduction band* TiO_2 sehingga molekul *dye* teroksidasi (D^+).



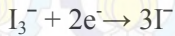
Elektron yang telah dialirkan melalui rangkaian eksternal, kembali menuju FTO yang terlapis *counter electrode*. *Counter electrode* mempercepat reaksi redoks yang terjadi pada larutan elektrolit..



Reaksi reduksi membuat larutan *dye* yang telah digunakan kembali pada *ground state*, sehingga molekul *dye* dapat digunakan kembali. Sedangkan, reaksi oksidasi membuat ion I^- menjadi I_3^- . Pada larutan elektrolit, terjadi juga reaksi reduksi yang lain, dimana ion I_3^- akan kembali menjadi



I^- , sehingga dapat mendonor elektron agar bisa kembali tereksitasi, sehingga terjadi siklus transport elektron. Reaksi reduksi triiodida yang dimaksud ditunjukkan oleh Persamaan (2.6).



Akibat adanya siklus transport elektron, maka terjadilah proses konversi energi dari energi sinar matahari menjadi energi listrik.

2.3.2 Struktur *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC)

Dye Sensitized Solar Cell merupakan suatu perangkat sel surya yang tersusun dari sepasang elektroda dan *counter* elektroda. Elektroda terbuat dari substrat kaca konduktif yang telah dilapisi *Transparent Conductive Oxide* (TCO), yang terdiri dari dua jenis yaitu *Indium Tin Oxide* (ITO) dan *Flourine Tin Oxide* (FTO).

Berbeda dengan sel surya konvensional, *Dye Sensitized Solar Cell* adalah sel surya fotoelektrokimia, sehingga menggunakan elektrolit sebagai medium transport muatan. Selain elektrolit, *Dye Sensitized Solar Cell* terbagi menjadi beberapa bagian yang terdiri dari material semikonduktor, molekul *dye* yang terabsorpsi di permukaan semikonduktor, dan katalis yang semuanya dideposisi di antara dua kaca konduktif.

Pada elektroda dilapisi oleh *layer* oksida nanopartikel yang dilapisi oleh molekul *dye* (zat pewarna) sensitasi. Molekul *dye* berfungsi sebagai penangkap foton cahaya, sedangkan nanopartikel semikonduktor berfungsi menyerap dan meneruskan foton menjadi elektron. Pada *counter* elektroda diberi katalis, umumnya karbon atau platinum, berfungsi untuk mempercepat kinetika reaksi proses reduksi triiodide pada TCO.

Selain itu, *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) juga menggunakan media elektrolit sebagai medium transport muatan. Elektrolit yang umumnya digunakan pada DSSC



terdiri dari iodine (I^-) dan triiodide (I_3^-) sebagai pasangan redoks dalam pelarut.

2.3.3 Substrat DSSC

Substrat pada *Dye Sensitized Solar Cell* yaitu jenis TCO (*Transparent Conductive Oxide*) yang merupakan kaca transparan konduktif. Material substrat berfungsi sebagai badan dari sel surya dan lapisan konduktifnya berfungsi sebagai tempat muatan mengalir. Keunggulan dari kaca konduktif ini adalah walaupun sifatnya konduktif secara elektrik, tetap dapat ditembus cahaya (Rahman, 2009). Material yang umumnya digunakan yaitu *flourine-doped tin oxide* ($SnO_2:F$ atau FTO) dan *indium tin oxide* ($In_2O_3:Sn$ atau ITO). Hal ini dikarenakan dalam proses pelapisan material TiO_2 kepada substrat, diperlukan proses *sintering* pada temperatur 400-500 °C dan kedua material tersebut merupakan pilihan yang cocok karena tidak mengalami *defect* pada *range* temperatur tersebut (Septina, 2007).

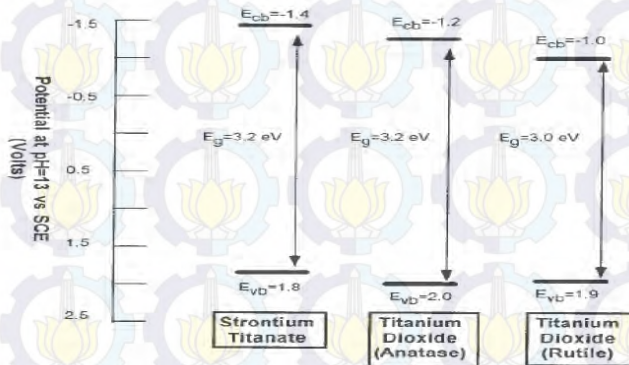
2.3.4 Lapisan Oksida Semikonduktor DSSC

Kemampuan suatu DSSC dalam mengkonversi energi cahaya menjadi energi listrik sangat ditentukan oleh *layer* oksida yang digunakan (Gratzel, 1998). Penggunaan oksida semikonduktor dikarenakan kestabilannya menghadapi fotokorosi. Selain itu lebar pita energinya yang besar ($> 3eV$) dibutuhkan untuk transparansi semikonduktor pada sebagian besar spektrum cahaya matahari, sehingga foton cahaya yang terserap pun lebih banyak (Septina, 2007).

Lapisan semikonduktor yang digunakan pada DSSC umumnya berbahan Titanium dioxide (TiO_2) yang dikenal juga dengan titanium (IV) oxide atau Titania. Di alam umumnya TiO_2 mempunyai tiga fasa yaitu rutile, anatase, dan brookite.

Pada DSSC, TiO_2 yang digunakan umumnya berfasa anatase karena mempunyai kemampuan fotoaktif yang tinggi. Penggunaan TiO_2 dengan fasa anatase ini dikarenakan juga fasa anatase memiliki energi level lebih tinggi dibandingkan fasa TiO_2 lainnya. Fasa TiO_2 anatase memiliki pita valensi

yang tinggi dan *conduction band gap* yang lebih lebar. Hal ini ditunjukkan pada gambar 2.9 di bawah ini.



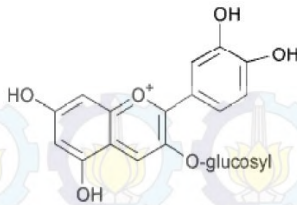
Gambar 2.8 Perbandingan pita valensi fasa TiO_2

TiO_2 dengan struktur nanopori, yaitu ukuran pori dalam skala nano, akan menaikkan kinerja sistem karena struktur tersebut mempunyai karakteristik luas permukaan yang tinggi sehingga akan menaikkan jumlah *dye* yang terserap yang implikasinya akan menaikkan jumlah cahaya yang ditangkap.

2.3.5 Larutan *Dye* DSSC

Dewasa ini telah dikembangkan DSSC dengan zat pewarna organik yang murah dan mudah didapat yaitu, dengan menggunakan unsur pewarna alami (*Flavonoids*) dari buah-buahan, bunga, kayu dan bahan organik lainnya. *Flavonoids* berfungsi sebagai proteksi terhadap sinar *Ultra Violet* (Grätzel, 1998).

Flavonoids yang umum digunakan pada DSSC adalah yang memiliki kandungan *anthocyanin*, yang didapat pada buah-buahan, bunga, dan tumbuhan berwarna merah atau keungu-unguan. Salah satu pigmen *cyanin* yang memegang peranan penting dalam proses absorpsi cahaya yaitu *cyanidin 3-O- β -glucoside* (Septina, 2007). Struktur kimianya ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2.9 Struktur kimia *dye anthocyanin*

Pada penelitian ini, *dye* yang digunakan adalah *dye* organik. *Dye* organik tersebut diambil dari tanaman yang salah satu bagiannya terdapat zat antosianin. Zat antosianin tersebut pada tanaman ditandai warna pada bagian tanaman berupa warna keunguan, kemerahan, atau kehitaman. (Timberlake and Bridle, 1982) Salah satu tanaman yang diidentifikasi memiliki zat antosianin tersebut adalah bunga Geranium Ungu. Geranium ungu memiliki nama ilmiah *Geranium sylvaticum*. *Geranium sylvaticum* adalah tumbuhan yang memiliki umur hidup yang panjang. Bunga ini bisa ditemukan di padang rumput atau di pinggir jalan. (Tuominen, 2013)

Adapun pada bunga Geranium ungu, antosianin terdapat pada bagian mahkota bunga. Hal tersebut ditandai dengan warna mahkota bunga yang berwarna ungu. Klasifikasi ilmiah bunga Geranium ungu (dikutip dari website <http://www.sith.itb.ac.id/herbarium>), adalah sebagai berikut:

- Divisi: *Magnoliophyta*
- Kelas: *Magnoliopsida*
- Bangsa: *Geraniales*
- Suku: *Geraniaceae*
- Marga: *Geranium*
- Jenis: *Geranium sylvaticum*



Gambar 2.10 Bunga Geranium (sumber:
<http://www.plantpref.co.uk/all-geraniums/geranium-sylvaticum-birch-lilac.html>)

2.3.6 Elektrolit pada DSSC

Elektrolit pada DSSC berfungsi sebagai penghasil reaksi redoks dalam sistem *photoelectrochemical*. Elektrolit yang digunakan terdiri dari pasangan iodine (I^-) dan triiodide (I_3^-) sebagai redoks dalam pelarut. Menurut Septina (2007), karakterisasi elektrolit yang ideal digunakan pada DSSC antara lain:

1. Potensial redoksnya secara termodinamika berlangsung sesuai dengan potensial redoks dari *dye* untuk tegangan sel yang maksimal.
2. Tingginya kelarutan terhadap pelarut untuk mendukung konsentrasi yang tinggi dari muatan pada elektrolit.
3. Pelarut mempunyai koefisien difusi yang tinggi untuk transportasi massa yang efisien.
4. Tidak adanya karakteristik spektral pada daerah cahaya tampak untuk menghindari absorpsi cahaya datang pada elektrolit.
5. Kestabilan yang tinggi baik dalam bentuk tereduksi maupun teroksidasi.
6. Mempunyai reversibilitas tinggi.
7. Inert terhadap komponen lain pada DSSC

Pemilihan pasangan redoks I_3^-/I^- bukan tanpa alasan. Laju rekombinasi elektron dan lubang setelah terjadinya



pemisahan muatan yang harus ditekan, dapat terjadi pada pasangan redoks tersebut (Rahman, 2009).

2.3.7 Katalis Counter Electrode

Katalis dibutuhkan untuk mempercepat kinetika reaksi proses reduksi triiodide pada TCO. Umumnya digunakan platina sebagai katalis dalam berbagai aplikasi dikarenakan efisiensi katalitiknya yang tinggi. (Septina, 2007). Pendekomposisian platina pada *Transparent Conductive Oxide* (TCO) dapat dilakukan dengan berbagai metode antara lain elektrokimia, *sputtering*, *spin coating*, atau *pyrolysis*. Namun, platina merupakan material yang mahal.

Sebagai alternatif, Kay & Gratzel (1996) mengembangkan desain *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) menggunakan *counter* elektroda Pd/Au. Counter Electrode Pd/Au digunakan karena memiliki luas permukaan yang tinggi, sehingga keaktivannya dalam reduksi triiodide dapat menyerupai platina dan karbon. Untuk mendapatkan *coating* Pd/Au yang lebih tahan lama dapat dihasilkan dengan melakukan *anneal* karbon *counter* elektroda pada temperatur 450°C untuk beberapa menit (Gratzel, 1998).

2.4 Metode Hydrothermal

Hydrothermal terbentuk dari kata *hydro* yang berarti air dan *thermal* yang berarti panas, sehingga dapat diartikan metode *hydrothermal* menggunakan panas dan air yang sifatnya merubah larutan menjadi padatan. Pada praktiknya, metode ini melibatkan pemanasan reaktan dalam wadah tertutup (*autoclave*) menggunakan air. Dalam wadah tertutup, tekanan meningkat dan air tetap sebagai cairan.

Metode *hydrothermal* (penggunaan air sebagai pelarut di atas titik didihnya) harus dilakukan pada sistem yang tertutup untuk mencegah hilangnya pelarut saat dipanaskan di atas titik didihnya. Jika pemanasan ini mencapai di atas titik didih normalnya, yaitu 373 K maka disebut "*super heated water*". Kondisi saat tekanan meningkat di atas tekanan atmosfer dikenal sebagai kondisi *hydrothermal*. Kondisi *hydrothermal* terdapat secara alamiah dan beberapa mineral



seperti zeolit alam terbentuk melalui proses ini (Ismagilov, 2012).

Sintesis *hydrothermal* merupakan teknik atau cara kristalisasi suatu bahan atau material dari suatu larutan dengan kondisi temperatur dan tekanan tinggi. Sintesis *hydrothermal* secara umum dapat didefinisikan sebagai metode sintesis suatu kristal yang sangat ditentukan oleh kelarutan suatu mineral dalam air dengan temperatur maksimal (temperatur pada alat 400°C) dan bertekanan tinggi (tekanan maksimal pada alat 400 bar). Proses pelarutan dan pertumbuhan kristalnya dilakukan dalam bejana yang dinamakan *autoclave*, yaitu berupa wadah terbuat dari baja yang tahan pada temperatur dan tekanan tinggi. Pertumbuhan kristal terjadi karena adanya gradien temperatur yang diatur sedemikian rupa sehingga pada bagian yang lebih panas akan terjadi reaksi larutan, sedangkan pada bagian yang lebih dingin terjadi proses supersaturasi dan pengendapan kristal. Teknologi ini dikenal dengan metode *hydrothermal* (Agustinus, 2009).

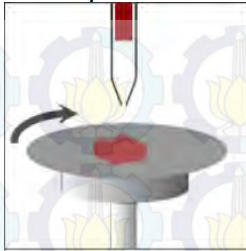
2.5 Metode *Spin Coating*

Spin coating merupakan cara yang mudah dan efektif dalam pembentukan lapisan film tipis (*thin film*) di atas substrat datar. *Spin coating* merupakan teknik pelapisan bahan dengan cara menyebarkan larutan ke atas substrat, kemudian diputar dengan kecepatan konstan untuk memperoleh lapisan baru yang homogen.

Spin coating melibatkan akselerasi dari genangan cairan di atas substrat yang berputar. Material pelapis dideposisi di tengah substrat. Pada saat sampel berputar terdapat adanya gaya sentrifugal dan pengaruh viskositas cairan yang membuat cairan tidak lepas dari *chuck spin coater*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.12.

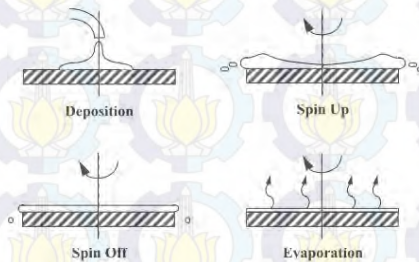
Beberapa parameter yang terlibat dalam *spin coating* yaitu viskositas larutan, kandungan padatan, kecepatan angular, dan waktu putar. Proses pembentukan film dipengaruhi oleh dua parameter bebas yaitu kecepatan putar

dan viskositas. Rentang ketebalan film yang dihasilkan oleh *spin coating* adalah 1 – 200 μm .



Gambar 2.11 *Spin coating*

Proses *spin coating* dibagi menjadi empat bagian yang ditunjukkan Gambar 2.12 yaitu deposisi, *spin up*, dan *spin off* yang terjadi secara berurutan, sedangkan evaporasi terjadi di seluruh proses, hal inilah yang menjadi sebab utama terjadinya penipisan.



Gambar 2.12 Tahapan *spin coating*

Proses pengendapan (deposisi) ini melibatkan terbuangnya cairan pada saat putaran substrat yang statis maupun yang pelan. Cairan diendapkan melalui *nozzle* pada pusat *spin coater* atau lebih beberapa jalur yang telah diprogram. Jumlah cairan yang berlebih ini digunakan untuk mencegah terjadinya diskontinuitas pelapisan yang disebabkan oleh pengeringan cairan pada bagian tengah sebelum mencapai bagian pinggir.



Pada bagian putaran atau *spin up*, substrat dipercepat dengan kecepatan putaran akhir. Sebagai gaya rotasi yang diberikan ke atas melalui cairan, sehingga terbentuk gelombang dan mengalir ke substrat dengan gaya sentrifugal.

Spin off merupakan tahap *spin coating*, dimana kelebihan pelarut terbuang dari permukaan substrat seperti berputar pada kecepatan antara 2000 rpm dan 8000 rpm. Cairan pun menjadi menipis dengan adanya gaya sentrifugal hingga cukup pelarut yang telah dihilangkan untuk meningkatkan viskositas ke tingkat dimana aliran berhenti. Bagian *spin off* ini berlangsung kira-kira 10 detik setelah *spin up*. Proses penguapan ini merupakan proses utama dari penipisan film. Evaporasi ini merupakan proses yang kompleks dimana sebagian larutan yang lebih akan di-absorb oleh lingkungan. Berbagai ketebalan dapat dihasilkan oleh *spin coating*, karena ketebalan berbanding terbalik dengan akar kuadrat dari kecepatan putar (Luurtsema, 1997).

2.6 Proses Kalsinasi

Proses kalsinasi merupakan proses perlakuan panas yang diterapkan pada sebuah bahan yang bertujuan untuk dekomposisi termal, transisi fasa, dan penghapusan fraksi *volatile*, serta berfungsi untuk mengeliminasi senyawa yang berikatan secara kimia. Proses kalsinasi terjadi pada temperatur di bawah titik lebur bahan untuk menghilangkan kandungan bahan yang dapat menguap. Kalsinasi berperan dalam proses penghilangan air, karbon dioksida, atau gas lain. Kalsinasi berbeda dengan proses pemanggangan, dimana jika pada proses pemanggangan reaksi gas-solid lebih kompleks terjadi antara padatan dan atmosfer dari tungku (Sugiono, 2002).

Proses ini merupakan penyelesaian yang umum dengan cara mengubah hidroksida menjadi oksida gel yang didapatkan dengan perlakuan dari garam dengan amoniak. Perlakuan tersebut belum menjamin homogenitas jika kecepatan pembentukan gel (*gelation*) tidak sama untuk berbagai komponen dari suatu sistem. Proses pengendapan

yang sering dilakukan dicapai melalui proses hidrolisis dari alkosida. Kerugian dari proses keramik dengan menggunakan *precursor* meliputi: penyusutan yang besar (oleh rute sol-gel), bahan baku mahal, dan bahan baku tidak stabil (misal, reaktivitas alkosida terhadap air).

Produk dari proses kalsinasi biasanya disebut secara umum sebagai kalsin. Kalsinasi diproses dalam sebuah tungku atau reaktor seperti *furnace*, *rotary kiln*, dan tungku perapian ganda. Semakin tinggi temperatur kalsinasi, semakin besar ukuran partikel. Hal ini disebabkan karena proses kalsinasi akan menyebabkan reaksi zat padat, pengkristalan, dan terjadi peleburan, sehingga ikatan akan terlepas. Kalsinasi dilakukan pada suatu bahan untuk memutus ikatan molekul antar senyawa pada bahan tersebut (Wang, 2003).

2.7 Graphene

Graphene pertama kali ditemukan oleh Geim dan Novoselov pada tahun 2004. *Graphene* merupakan satu lapis (tebal ~ 0.34 nm) atom karbon yang mengalami hibridisasi sp^2 (berikatan kovalen dengan 3 atom lainnya) dengan susunan kisi segi enam planar (*honeycomb lattice* 2D) membentuk struktur yang unik, baik sifat mekanik maupun kelistrikan (Basu dkk, 2012).

Pada dasarnya *graphene* merupakan struktur dasar dari material berbasis karbon seperti grafit (*Stacked graphene*), *Carbon nanotubes* (CNTs/ *Graphene* yang melingkar pada arah aksial) dan *fullerene* (*Graphene* yang menyerupai bola) seperti pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Bentuk Karbon berikatan sp^2 (a) Grafit (b) *Graphene* (c) CNTs (d) *Fullerene* (Katnelson, 2007)

Graphene menjadi sangat menarik untuk diteliti dan dikembangkan oleh dunia industri untuk berbagai aplikasi

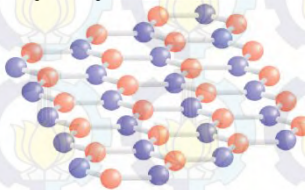
misalnya, transistor skala nano, bio sensor dan sensor kimia, *Fleksibel* dan *Organic Light-Emitting Dioedes (OLEDs)*, Sel surya dan sel bahan bakar, serta berbagai inovasi aplikasi lainnya (Choi dkk, 2012).

2.8 Sifat *Graphene*

Struktur unik dari *graphene* menjadikan *graphene* memiliki sifat yang baik meliputi mobilitas pembawa yang tinggi, efek *Quantum Hall* pada temperatur ruangan, transparansi optik yang baik, luas permukaan spesifik, modulus young, dan konduktivitas panas yang sangat baik (Zhang dkk, 2012).

1. Morfologi dan Struktur

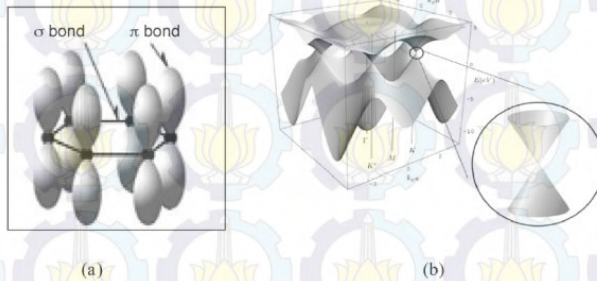
Kisi *Graphene* tersusun atas dua *sub-lattice* atom karbon yang berikatan satu sama lain dengan ikatan σ . Setiap atom carbon pada *lattice* memiliki orbital π yang menyebabkan delokalisasi jaringan elektron (Terrones dkk, 2010). Struktur sel *graphene* terdiri dari dua atom *non-equivalent*. dan kedua atom terhubung satu sama lain dengan jarak antar karbon $a_c = 1.44 \text{ \AA}$ seperti pada Gambar 2.14



Gambar 2.14 Struktur *Graphene* yang tersusun atas Dua Atom Non-equivalen (Katnelson, 2007)

Satu atom karbon memiliki empat elektron valensi dengan konfigurasi elektron $[\text{He}] 2s^2 2p^2$. Pada *graphene*, ikatan kimia atom-atom karbon merupakan superposisi 2s dengan orbital $2p_x$ dan $2p_y$. Orbital planar memberikan kesetimbangan energi ikatan σ dengan 3 atom carbon yang berdekatan pada kisi heksagonal 2D seperti Gambar 2.3(a). Atom-atom karbon ini menjadi sangat responsif terhadap energi

ikatan dan sifat elastisitas dari lembaran *graphene* (Choi dkk, 2012). Sedangkan orbital lainnya yaitu $2p_z$ (aksis z tegak lurus dengan bidang *graphene*) membentuk orientasi simetris dua pita π (membentuk kerucut) seperti Gambar 2.3(b) dan bertumpuknya orbital ini dengan atom sekitar menjadikan *graphene* memiliki sifat elektronik yang baik (Zhang dkk, 2012).

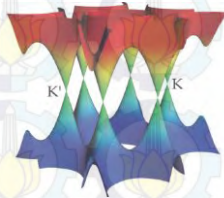


Gambar 2.15 (a) Susunan Ikatan σ dan Ikatan π pada Struktur *Graphene* (b) Orbital $2p_z$ membentuk Dua Pita Simetris pada Ujung Zona Brillouin Pertama (Basu dkk, 2012)

Karena susunan yang simetris, elektron diantara *sub-lattice* menyebabkan pembentukan dua pita energi pada zona Brillouin pertama, yang berpotongan pada titik K . Di daerah dekat perpotongan, energi elektron sebanding dengan vektor gelombang. Dispersi linear ini menghasilkan eksitasi massa (elektron tidak bermassa) yang digambarkan oleh persamaan Dirac. *Dirac fermions* (*electron* atau *hole*) menunjukkan sifat yang sangat berbeda dan tidak bisa dibandingkan dengan elektron pada umumnya, sehingga menyebabkan fenomena baru. Sebagai contoh, anomali efek *Quantum hall* dapat diamati pada kondisi temperatur kamar (Terrones dkk, 2010).

2. Sifat Elektronik

Sifat elektronik *graphene* sangat dipengaruhi oleh orbital p_z dalam susunan struktur *graphene*. Orbital p_z membentuk dua pita π yang saling simetris membentuk kerucut. Zona Brillouin pertama memiliki dua titik tidak ekuivalen k dan k' (*Dirac point*) ketika terjadi perpotongan pita (Gambar 2.4).



Gambar 2.16 Pertemuan Pita Konduksi dan Pita Valensi pada K dan K'

Tight-binding hanya mempertimbangkan interaksi elektron yang paling berdekatan dengan *Dirac point* (Zhu dkk, 2010) sesuai persamaan 2.7

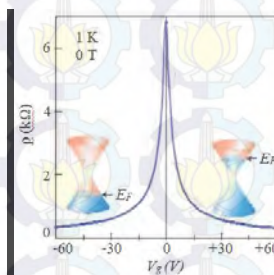
$$E(k_x, k_y) = \pm \gamma \sqrt{1 + 4 \cos \frac{k_x a \sqrt{3}}{2} \cos \frac{k_y a}{2} + 4 \cos^2 \frac{k_y a}{2}} \quad (2.7)$$

Dimana k_x dan k_y merupakan komponen vektor k yang ditutup pada zona Brillouin pertama dan $\gamma = 2.75$ eV merupakan *hopping energy* (Choi dkk, 2012). Sedangkan $a = \sqrt{3}a_{c-c}$, besarnya a_{c-c} adalah 1.4 \AA . Tanda negatif digunakan untuk pita valensi *graphene* (π) yang terisi penuh. Sedangkan tanda positif digunakan untuk pita konduksi (π^*) yang hampir kosong (Zhu dkk, 2010)

Struktur pita *graphene* seperti Gambar 2.3(b) merupakan model sederhana *tight-binding* yang menghasilkan pita konduksi dan pita valensi simetris mencapai energi Fermi (*Dirac Point* atau titik netralitas muatan) sama dengan 0 eV. Pita valensi dan pita konduksi *graphene* turun pada 6 titik yang berada pada sudut zona Brillouin, atau lembah k dan k' .

Karena permukaan Fermi *graphene* mendekati *zero dimension zone* pada 6 titik zona Brillouin, *graphene* disebut sebagai material semilogam tanpa pertumpukan pita atau *zero band gap semiconductor* (Choi, 2012).

Pengamatan eksperimen menggunakan *cyclotron mass* bergantung pada akar pangkat dua densitas elektronik *graphene* yang diinterpretasikan sebagai bukti keberadaan *Massless Dirac quasi particles* pada *graphene*. Karena tidak ada celah pita *semiconductor*, *graphene* memperlihatkan medan magnet ambipolar dan muatan pembawa antara elektron dan *hole* pada konsentrasi setinggi 10^{13} cm^{-2} dengan mobilitas pada temperatur kamar mencapai $15000 \text{ cm}^2/\text{V s}$ (Gambar 2.5). Selain itu, mobilitas akan semakin melemah terhadap temperatur, mobilitas *graphene* akan meningkat tajam pada kondisi temperature kamar dengan meminimalkan *impurity scattering*, hingga mencapai $200000 \text{ cm}^2/\text{V s}$. Sementara dengan densitas pembawa $\sim 10^{12}/\text{cm}^2$ dan resistivitas $\sim 10^{-16} \Omega \text{ cm}$. Nilai resistivitas ini lebih rendah dari perak, material dengan resistivitas terendah pada temperatur kamar (Basu dkk, 2012).

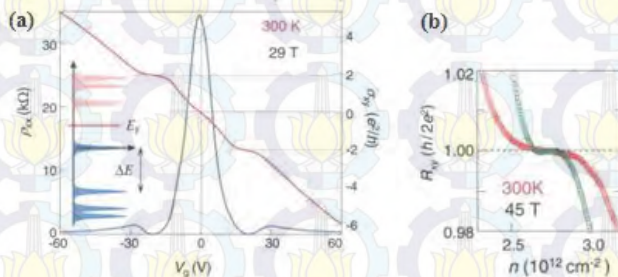


Gambar 2.17 Efek Medan Listrik Ambipolar pada *Graphene*

Parameter lain yang menjadi acuan kualitas elektronik *graphene* adalah *Quantum Hall Effect*

(QHE). QHE merupakan karakteristik gas elektron dua dimensi pada medan magnet yang kuat.

QHE pada umumnya terjadi pada temperature yang sangat rendah, yaitu dibawah titik didih Helium cair. Namun, pada *graphene* QHE dapat diamati pada temperataur ruang. Hal ini disebabkan karena *graphene* memiliki konsentrasi pembawa yang sangat tinggi ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) dengan *sub-band* yang terisi hampir penuh hingga mencapai *Landau level* pada medan magnet tinggi. Hal ini berlawanan dengan sistem 2D pada umumnya, *sub-band* menjadi kosong pada medan magnet menengah. Selain itu, QHE juga dipengaruhi mobilitas *graphene* yang selalu konstan yaitu $\sim 10.000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, baik dalam kondisi temperatur didih helium cair maupun temperatur kamar.



Gambar 2.18 QHE *Graphene* pada Temperatur Ruang
(a) *Hall Conductivity* (b) *Hall Resistance* (Novoselov dkk, 2007)

Gambar 2.6 menunjukkan QHE *graphene* pada temperatur ruang. Pada gambar 2.6(a) Pada temperatur ruang, *Hall Conductivity*, σ_{xy} , menunjukkan puncak pada $2e^2/h$ baik untuk elektron maupun *hole*, konduktivitas longitudinal, ρ_{xx} hampir nol ($< 10 \text{ k}\Omega$) dengan energi aktivasi $\sim 600 \text{ K}$. σ_{xy} (merah) dan ρ_{xx} (biru) merupakan fungsi dari *gate Voltage* (V_g) pada medan magnet 29T. Nilai positif

menunjukkan electron dan nilai negative untuk *hole* pada konsentrasi $n = 7.2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{V}^{-1}$. Sedangkan gambar 2.6(b) *Hall resistance*, R_{xy} , untuk elektron (merah) dan *hole* (hijau) menunjukkan keakuratan pengamata kuantitas pada medan magnet 45 T (Novoselov, 2007).

Sifat elektronik *graphene* akan berubah sesuai jumlah lapisan dan posisi atom pada lapisan yang berdekatan (*stacking order*). Untuk *bilayer graphene*, *stacking order* dapat terjadi AA, dengan masing-masing atom berada pada bagian atas atom yang lain, atau AB, atom-atom pada lapisan kedua berada diatas *empaty center* dari struktur heksagonal pada lapisan pertama. Apabila jumlah lapisan bertambah, *stacking order* menjadi lebih kompleks (Terronesa dkk, 2010).

Batas ketebalan *graphene* harus dipertimbangkan karena memberikan perubahan drastis pada struktur elektronik karena jumlah lapisan bertambah. *Bilayer graphene* memiliki pita parabolik (bukan *Dirac electron*), yang mencapai batas energi Fermi. Berada dibawah medan listrik, jarak antara *bilayer graphene* menjadi besar. Pada umumnya *few-layer graphene* (FLG) dengan N lapisan (*AB stacking*) akan terjadi pita linear (*Dirac Fermions*) apabila N tidak normal. Karena jumlah layer meningkat, struktur pita menjadi lebih kompleks, semakin banyak pembawa muatan, pita konduksi dan valensi mulai bertumpukan (Terronesa dkk, 2010).

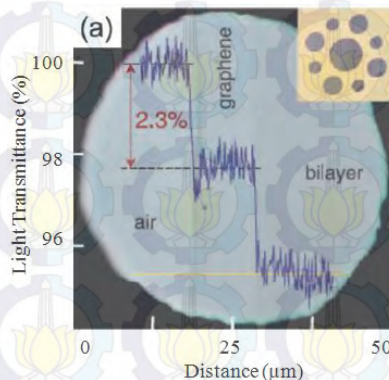
3. Sifat Mekanik

Sifat mekanik *graphene* monolayer meliputi modulus young dan *Fracture strength*. Hown dan coworkers (2008) telah menjelaskan bahwa *graphene* memiliki kekuatan patah 200 kali lebih besar dari pada baja. *Graphene* memiliki Modulus Young 1.0 TPa dan *Fracture strength* 130 GPa. (Zhu dkk, 2010) dan memiliki keuletan hingga 25%. Ketebalan mekanik *graphene* dapat dikendalikan seperti yang ditunjukkan

pada performa pengukuran tegangan mekanik (Choi, 2012).

4. Sifat Optik

Graphene memiliki frekuensi konduktivitas yang tinggi untuk Dirac fermion dan dinyatakan sebanding dengan $\pi e^2/2h$, meliputi spektrum infra merah hingga sinar tampak. Apabila transmisi optik adalah T dan refleksi adalah R maka $T=(1+1/2\pi\alpha)^{-2}$ dan $R=1/4\pi^2\alpha^2T$ untuk sinar datang pada kondisi normal (kondisi dimana $\alpha=2\pi e^2/hc=1/137$, e adalah electron, c merupakan kecepatan cahaya dan h adalah konstanta plank). Sifat keoptikan $(1 - T)=\pi\alpha=2.3\%$. Nilai T dan R merupakan parameter dasar untuk menghasilkan struktur dan sifat elektronik *graphene*.



Gambar 2.19 Profil Intensitas Transmisi Sinar Putih terhadap Sinar kuning melalui *Graphene Flakes* (Novoselov dkk, 2008)

Gambar 2.7 menjelaskan bahwa transparansi optik dari *graphene* ($< 97.7\%$) telah diidentifikasi pada rentang gelombang sinar tampak dan transmisi secara linear akan berkurang dengan meningkatnya jumlah n layer pada *graphene*. Terjadi deviasi ketika peristiwa foton berada pada tingkat energi lebih rendah dari 0.5 eV, yang berkaitan dengan batas



temperatur dan potensi doping kimia dari kenetralan muatan (Dirac point).

5. Sifat Thermal

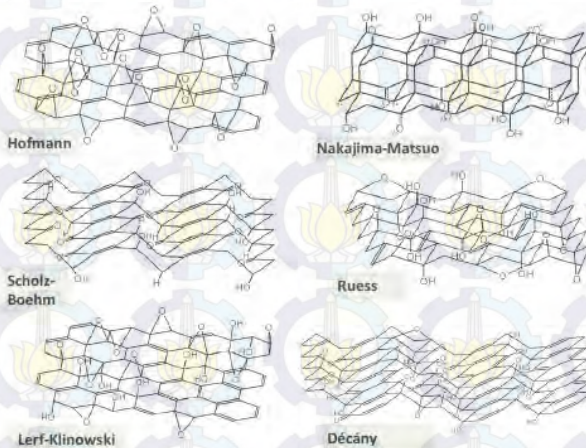
Densitas pembawa pada *graphene* tanpa doping sangat rendah, peran elektronik terhadap konduktivitas panas dapat diabaikan. Konduktivitas panas (k) didominasi oleh transfer fonon, atau disebut sebagai *Diffusive condition* pada temperatur tinggi dan *ballistic conduction* pada temperature rendah. Simulasi MD memperlihatkan bahwa $k \sim 1/T$ bergantung pada *defect-free graphene* karena temperatur T meningkat hingga 100 K. Pada temperatur kamar konduktivitas panas *graphene* monolayer adalah 6000W/mK, dan nilai konduktivitas panas ini mejadi lebih tinggi dari pada karbon dalam bentuk grafit (Zhu dkk, 2010).

2.9 Grafit Oksida

Grafit oksida (GO) pertama kali ditemukan oleh Scheffhaeut (1840) dan Brodie (1859) (Pei dkk, 2011). Grafit oksida, merupakan paduan karbon, oksigen, hidrogen dengan rasio tertentu. Rasio C:O 2.1 – 2.9.

GO memiliki kelarutan tinggi dalam air karena gugus fungsional oksigen pada bidang basal dan bagian sudut. Proses ultrasonikasi pada GO hidrofilik dalam air dapat menghasilkan satu lapisan GO. Gangguan pada ikatan sp^2 pada struktur grafit disebabkan oleh lampiran elektronegatif atom oksigen yang membuat kelistrikan GO terinsulasi (Basu, 2012). Pada kondisi ideal *graphene* hanya memiliki atom karbon dengan ikatan trigonal sp^2 dan sangat rata sempurna secara mikroskopis. Sedangkan sebagian lembaran GO adalah atom karbon berikatan tetrahedral sp^3 , yang berpindah posisi sedikit diatas atau dibawah bidang *graphene*. Hal ini disebabkan oleh deformasi struktur dan keberadaan ikatan kovalen pada gugus fungsional, sehingga lembaran GO bersifat kasar (Pei dkk, 2011).

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan model struktur GO dengan keteraturan kisi yang terdiri atas perulangan unit bersifat diskret. Oksida karbon memiliki keunikan bentuk, struktur GO berada diluar lingkup senyawa organik dan *Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs)*. Beberapa peneliti telah menemukan paling tidak enam model struktur yang berbeda dari GO seperti pada Gambar 2.8. Hal ini dapat terjadi sebab kerumitan material akibat sifat amorfusnya dan karakter berthollide (komposisi atom yang non-stoikiometrik).



Gambar 2.20 Model struktur GO (Szabo dkk, 2006)

2.10 Proses Oksidasi

Metode sintesis *graphene* telah banyak dikembangkan oleh para peneliti, diantaranya CVD, *micromechanical exfoliation*, *Epitaxial*, Reduksi GO. Dari metode sintesis *graphene* yang ada, proses reduksi GO merupakan metode yang paling direkomendasikan untuk produksi *graphene* dalam jumlah cukup banyak.

Sebelum reduksi GO, maka material grafit harus dioksidasi. Beberapa peneliti, Broudie (1859), Stadenmaier (1898), Hummer dan Offemen (1958) telah mengembangkan



proses oksidasi grafit. Perbandingan ketiga metode oksidasi tersebut diperlihatkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Metode Oksidasi Grafit menjadi GO
(Owen dkk, 2010)

	Brodie	Staudenmaier	Hummer	Modifikasi Hummer	
Tahun	1859	1898	1958	1999	2004
Oksidator	KClO ₃ , HNO ₃	KClO ₃ , (atau NaClO ₃), HNO ₃ , H ₂ SO ₄	NaNO ₃ , KMnO ₄ , H ₂ SO ₄	Pre-ox: K ₂ S ₂ O ₈ , P ₂ O ₅ , H ₂ SO ₄ Ox: KMnO ₄ , H ₂ SO ₄	NaNO ₃ , KMnO ₄ , H ₂ SO ₄
Rasio C/O	2.16 – 2.28	N/A – 1.85	2.17 – 2.25	1.3	1.8
Lama Reaksi	3 – 4 Hari / 10Hari	1 – 2 Hari/ 10Hari	2 – 10 jam	6 jam pre- ox dan 2 jam ox	~5 Hari
Jarak antar lembaran (Å°)	5.95	6.23	6.67	6.9	8.3

Metode Hummer menggunakan larutan NaNO₃, H₂SO₄, KMnO₄, dan H₂O₂. Produk oksidasi kemudian dimurnikan dengan pencucian 10% HCl, dan dilanjutkan dengan pencucian DI water (Tien dkk, 2012).

Permanganate merupakan oksidan (*dihydroxylations*), berupa Mn₂O₇. Terbentuk minyak berwarna merah tua dari hasil reaksi KMnO₄ dengan H₂SO₄. Aktivasi Ion MnO₄⁻ yang sangat reaktif hanya terjadi pada kondisi asam sesuai persamaan 2.2 dan 2.3. Transformasi MnO₄⁻ menjadi bentuk yang lebih reaktif Mn₂O₇ akan sangat membantu mengoksidasi grafit, tetapi bentuk bimetal dari permanganate oksida diketahui dapat meledak jika mengalami pemanasan melebihi 55 °C. Tromel dan Russ telah membuktikan kemampuan

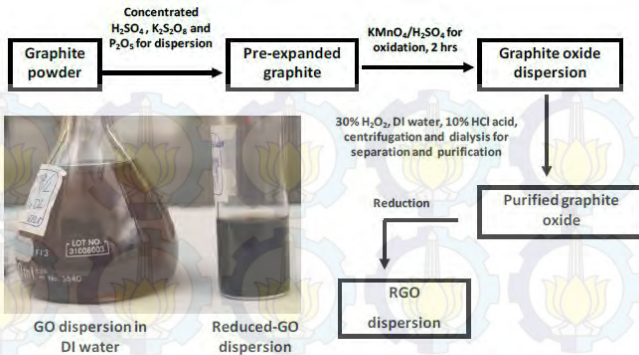


Mn_2O_7 dalam memilih oksida berikatan rangkap alifatik lebih ikatan rangkap aromatik. Hal ini merupakan gambaran penting struktur grafit dan proses reaksi yang terjadi selama oksidasi (Dreyer, 2009).



Grafit dicampurkan dengan H_2SO_4 pada temperature 0 °C. Kemudian distirring dengan penambahan KMnO_4 secara bertahap. Proses stirring harus dijaga pada temperature dibawah 35 °C selama 24 jam. Proses berikutnya adalah penambahan aquades pada campuran. Karena penambahan aquades pada H_2SO_4 konsentrasi medium melepaskan sejumlah panas, maka temperaturnya harus dikontrol kurang dari 100 °C. 30% H_2O_2 harus ditambahkan dalam campuran untuk mereduksi sisa KMnO_4 . Ketika hidrogen peroksida ditambahkan maka terbentuk gelembung-gelembung dan warna larutan berubah menjadi kuning cerah. Selanjutnya untuk menghilangkan ion-ion dari aquades maka campuran harus dicuci dengan menggunakan HCl 5%. Produk campuran kemudian dikeringkan pada temperature 60 °C selama 24 jam (Wua dkk, 2009).

Namun, produk Hummer biasanya adalah bagian intinya berupa grafit sedangkan bagian luarnya adalah oksida grafit (GO). Untuk mengatasi hal ini, maka perlu dilakukan perlakuan sebelum melakukan proses Hummer untuk meningkatkan derajat oksidasi. Metode pra-oksidasi ini pertama kali diperkenalkan oleh Kovtukhova (1999), Grafit dicampurkan dengan H_2SO_4 , $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ dan P_2O_5 dijaga pada temperature 80 °C selama 6 jam. Hasil campuran kemudian dicuci dengan air dan dikeringkan. Selain dengan Pra-oksidasi, untuk menghasilkan produk GO yang sempurna metode Hummer juga dapat dimodifikasi dengan menambah jumlah potassium permanganat. Skema proses modifikasi metode Hummer diberikan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.21 Skema Modifikasi Metode Hummer (Gilje dkk, 2007)

2.11 Proses Reduksi

Reduksi GO pada dasarnya adalah untuk mencapai dua tujuan utama yaitu menghilangkan gugus fungsional dan mengembalikan cacat struktural. Penghilangan gugus fungsional harus memperhatikan dua efek apakah oksigen dapat dihilangkan dan apakah area yang sudah tereduksi dapat dikembalikan untuk struktur terkonjugasi (π) secara jangka panjang. Sehingga terdapat alur untuk perpindahan muatan pembawa dalam lembaran GO. Untuk pengembalian cacat structural terdapat dua kemungkinan, grafitisasi pada temperature tinggi dan *epitaxial growth* atau CVD pada daerah cacat dengan penambahan suplai karbon (Pei dkk, 2011).

Teknik reduksi Grafit oksida (GO) menjadi *Graphene* diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama yaitu *Thermal reduction* dan *Chemical reduction*. Kedua metode reduksi ini kemudian dikembangkan lagi seperti yang diberikan pada Tabel 2.2

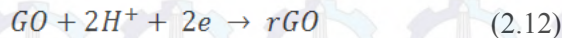
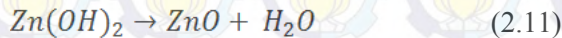
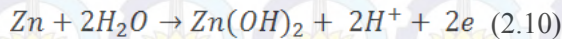
Salah satu bentuk *Chemical reduction* adalah *Chemical Reagent Reduction*. Reduksi dengan bahan kimia biasanya dapat berlangsung pada temperature ruangan atau dengan pemanasan temperatur menengah. Hal ini menjadikan proses reduksi GO dapat dilakukan lebih efisien dari pada dengan proses Annealing yang membutuhkan temperatur



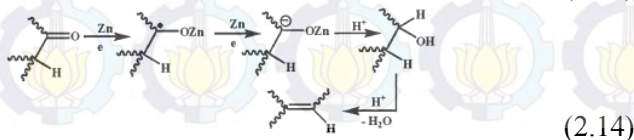
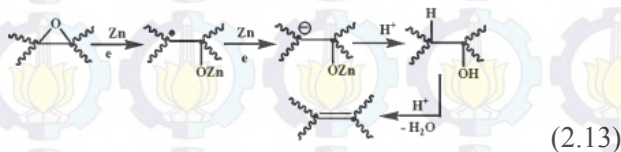
tinggi, sehingga proses reduksi kimia lebih murah, dapat dilakukan untuk produksi jumlah besar *graphene*.

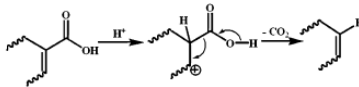
Stancovich dkk (2007) pertama kali memperkenalkan hydrazine dan turunannya sebagai Pereaksi kimia yang biasa digunakan untuk reduksi GO. Penambahan hydrazine dalam larutan GO menyebabkan terbentuk aglomerasi lembaran *graphene* skala nano karena GO bersifat hidrofobik. Setelah proses *drying* (pengeringan) rasio C/O rGO adalah 12.5 dan memiliki konduktivitas listrik 99.6 S/cm. Seiring berjalannya waktu, penemuan pereaksi kimia untuk reduksi GO bermunculan, misalnya dengan menggunakan NaBH_4 , Hydroquinon, Vitamin C, dan HI.

Zhi-Gang (2012) menyebutkan dalam penelitiannya bahwa proses reduksi *graphene oxide* (GO) menggunakan serbuk Zn akan terjadi sesuai persamaan 2.4 – 2.6.



Dey dkk (2011) mencoba mereduksi GO dengan Zn sebagai *Chemica reduction agent*. Dalam penelitiannya, Dey dkk menjelaskan mekanisme reduksi GO seperti pada persamaan 2.7 – 2.9. Zn berperan sebagai pereduksi gugus fungsi oksigen pada kondisi asam dan restorasi ikatan π pada jaringan karbon.





(2.15)

Persamaan 2.7 – 2.9 menjelaskan mekanisme reduksi kandungan oksigen pada struktur GO menggunakan Zn pada lingkungan asam. Selain itu juga mengembalikan konjugasi π pada struktur karbon. Deoksigenasi *epoxy* dapat disebabkan oleh berbagai logam misalnya Zn. Beberapa literatur menyatakan kombinasi Zn dan H_2SO_4 sangat efisien untuk deoksigenasi *epoxy* baik secara langsung maupun bertahap. Deoksigenasi bertahap dilanjutkan dengan pembentukan gugus *hydroxyl*. Disisi lain, gugus *carbonyl* direduksi menjadi alkohol oleh Zn pada lingkungan asam. Gugus *hydroxyl* dihasilkan oleh deoksigenasi *epoxy* dan reduksi *carbonyl* ketika dehidrasi pada kondisi asam untuk menghasilkan olefins. Metal sulfat diketahui bertindak sebagai katalisis alkohol. Dekarboksilasi gugus COOH dapat dikatalisis oleh asam.

2.12 Kompositisasi TiO_2 dengan *Graphene* pada DSSC

Secara umum, sebuah DSSC terdiri dari empat bagian yaitu fotoelektroda, *dye*, elektrolit, dan *counter electrode*. TiO_2 , material semikonduktor dengan *band gap* lebar (3,2 eV) adalah material yang sering digunakan sebagai fotoelektroda pada DSSC karena kelimpahan di Bumi yang banyak, relatif murah, memiliki stabilitas kimia yang baik, tidak beracun. (Hagfeldt et al., 2010). Pada DSSC, TiO_2 berperan sebagai *dye loader*, penerima elektron, dan penghantar elektron (Gratzel, 2003). Namun, ukuran partikel TiO_2 pada lapisan fotoelektroda terlalu kecil sehingga transpor elektron pada lapisan TiO_2 yang berpori adalah acak dan melompat- lompat. Akibat yang ditimbulkan dari model transpor elektron tersebut adalah meningkatnya rekombinasi antara elektron dan oksida dari *dye* atau oksida dari partikel pada elektrolit. Akibat dari fenomena tersebut, transpor elektron menjadi terhalang dan lebih jauh akan mengurangi efisiensi konversi fotoelektrik. (Cahen et al., 2000; Benkstein et al., 2003)



Oleh karena itu, penelitian pada DSSC menggunakan material semikonduktor TiO_2 difokuskan untuk mencegah rekombinasi muatan listrik dan meningkatkan transpor muatan listrik dengan mengoptimalkan struktur TiO_2 yang berpori. Salah satu cara yang efektif adalah dengan memberikan elemen doping kepada lapisan TiO_2 . Penelitian pada optimalisasi unjuk kerja DSSC TiO_2 yang telah banyak dilaporkan adalah dengan membentuk fotoelektroda dengan struktur komposit atau *heterojunction*. Sebagai salah satu contoh adalah dengan mengompositkan TiO_2 dan SiO_2 menggunakan metode elektrodesposisi yang memberikan peningkatan pada efisiensi DSSC sebesar 30% dibandingkan dengan DSSC TiO_2 murni. (Nguyen et al., 2007)

Salah satu material yang diharapkan mampu meningkatkan sifat fotokatalitik DSSC TiO_2 adalah *Graphene*. *Graphene* diharapkan mampu meningkatkan sifat fotokatalitik DSSC TiO_2 karena memiliki luas permukaan yang tinggi, konduktivitas listrik yang tinggi dan interfacial contact dengan adsorban yang baik. Selain itu, sifat pada permukaan *Graphene* yang dapat dilakukan modifikasi secara kimia dengan baik, dapat memudahkan *Graphene* untuk digunakan sebagai material penyusun komposit (Khalid et al., 2013).

Untuk pengompositan TiO_2 dengan *Graphene* sendiri telah banyak dilakukan, misalnya dengan menggunakan TiO_2 dengan komposisi *Graphene* menggunakan *spin coating* pada temperatur kamar yang diaplikasikan sebagai *working electrodes* pada DSSC menghasilkan peningkatan efisiensi konversi energi listrik sebesar 15% (Tsai et al. 2011)

Namun yang perlu diperhatikan dalam kompositisasi TiO_2 dengan *Graphene* adalah lapisan TiO_2 yang mudah mengalami *crack* apabila menggunakan metode *ball-milling* untuk membentuk penyusun fotoelektroda. Oleh karena itu, patut dipertimbangkan dalam kompositisasi lapisan TiO_2 -*Graphene* menggunakan metode *hydrothermal*. (Fang et al. 2014)



2.13 Hasil Penelitian Sebelumnya

Sebelum penelitian ini dilakukan, penelitian mengenai pembuatan DSSC, sintesis *Graphene*, dan pemanfaatan *Graphene* sebagai komponen penyusun DSSC telah banyak dilakukan. Penelitian terdahulu tersebut dimanfaatkan sebagai referensi dalam menentukan metode penelitian yang akan dilakukan pada penelitian ini. Adapun penelitian- penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian ini antara lain sebagai berikut:

Tabel 2.2 Penelitian Sebelumnya Terkait DSSC dan Sintesa *Graphene*

No.	Nama Peneliti (Tahun Penelitian)	Variasi		Hasil
1.	Nadeak (2012)	Dye	Ekstrak buah naga	$V = 562 \text{ mV}$ $J = 0.307 \text{ mA/ cm}^2$ $P = 0.1725 \text{ mW/cm}^2$ $\eta = 0.0383409\%$
		Semikonduktor	TiO_2	
		Temperatur kalsinasi	550°C	
		Waktu tahan kalsinasi	60 menit	
2.	Nafi (2013)	Dye	Ekstrak buah Terung Belanda	$V = 593,1 \text{ mV}$ $J = 0.356 \text{ mA/ cm}^2$ $P = 0.211 \text{ mW/cm}^2$ $\eta = 0.0469\%$
		Semikonduktor	TiO_2	
		Temperatur kalsinasi	650°C	
		Waktu tahan kalsinasi	60 menit	
3.	Shu, dkk. (2013)	Dye	N719	$V = 674 \text{ mV}$ $J = 12,16 \text{ mA/ cm}^2$ $P = -$ $\eta = 5.5\%$ $FF = 0,677$
		Semikonduktor	RGO- TiO_2 composites	
		Temperatur Kalsinasi	450°C	
		Waktu tahan kalsinasi	30 menit	
4.	Fang, dkk. (2014)	%wt RGO	0,75	$V = 0.68 \pm 0.01 \text{ V}$ $J = 13.35 \pm 0.07 \text{ mA/ cm}^2$ $FF = 0.65 \pm 0.01$ $\eta = 7.02 \pm 0.06\%$
		Dye	N719	
		Semikonduktor	Graphene Oxide- TiO_2	
		Temperatur Kalsinasi	500°C	
		Waktu tahan	30 menit	



kalsinasi			
Komposisi Graphene Oxide		15 μL	
5.	Fitria, dkk (2012)	Dye	Ekstrak kulit buah naga
		Semikonduktor	TiO ₂
		Temperatur kalsinasi	550°C
		Waktu tahan kalsinasi	60 menit
6.	Prasatya, dkk (2013)	Dye	Ekstrak daging buah terung belanda
		Semikonduktor	ZnO
		Temperatur kalsinasi	550°C
		Waktu tahan kalsinasi	30 menit
7.	Junaidi (2014)	Penambahan Zn	1,6 gr
		Waktu Ultrasonikasi	120 menit
		Waktu Hydrothermal	12 jam
8.	Pradesar (2014)	Penambahan Zn	1,6 gr
		temperatur hydrothermal	200 °C
		Waktu Ultrasonikasi	2 jam
		Waktu Hydrothermal	12 jam
9.	Azizah (2014)	Penambahan Zn	0,8 gr
		Temperatur Hydrothermal	200 °C
		Waktu Ultrasonikasi	120 menit
		Waktu Hydrothermal	12 jam
			V = 59.6 mV J = 0.0457 mA/ cm ² P = 0.0027 mW/cm ² η = 0.00148%
			V _{oc} =1140mV I _{sc} =0.591mA/cm ² P _{max} =0.67374mW/cm ² FF= - η=0.14972%
			σ (konduktivitas listrik) = 0.0105 S/m
			σ (konduktivitas listrik) =0.00021 S/m
			σ (konduktivitas listrik) = 0,10281 Bilangan Iodine= 11384,64

Dari tabel di atas ditunjukkan bahwa telah banyak penelitian mengenai komposisi *dye*, material semikonduktor terbaik pada DSSC sehingga didapatkan efisiensi konversi energi listrik terbaik untuk masing- masing metode. Penelitian oleh Fitria, dkk (2012) menggunakan semikonduktor TiO_2



pada temperatur kalsinasi 350 °C dengan waktu tahan 30 dan 60 menit menggunakan ekstrak larutan dye kulit buah naga menyimpulkan semakin tinggi waktu tahan kalsinasi akan meningkatkan voltase dan kuat arus DSSC. Nilai voltasenya sebesar 32,1 mV untuk waktu tahan 30 menit dan 45,7 mV untuk waktu tahan 60 menit.

Nadeak, dkk (2012) melakukan penelitian serupa dengan memanfaatkan daging buah naga merah, dan proses kalsinasi dengan variasi temperatur 350 °C, 450 °C, dan 550 °C, serta waktu tahannya masing-masing 30 menit dan 60 menit untuk tiap temperatur. Dalam penelitiannya disimpulkan bahwa kelistrikan terbesar yang dapat dicapai DSSC yaitu dengan temperatur kalsinasi 550 °C dan waktu tahan kalsinasi selama 60 menit, dengan nilai voltase sebesar 562 mV, densitas arus sebesar 0,307 mA/cm², daya sebesar 172,3 mW/cm², efisiensi 0,038% dengan penurunan voltase dalam rentang 1,31-8,74%

Nafi (2013) melakukan penelitian dengan memanfaatkan daging buah terung belanda menghasilkan nilai kelistrikan yang lebih baik dari sebelumnya (ditunjukkan dengan adanya peningkatan efisiensi menjadi sebesar 0,0469%) dengan menambahkan variasi temperatur dan waktu tahan kalsinasi yang lebih tinggi pada penelitian sebelumnya (650 °C selama 60 menit).

Selain mengacu penelitian sebelumnya mengenai perangkaan DSSC, penelitian ini juga mengacu pada penelitian sebelumnya mengenai sintesa *Graphene*. Hal tersebut dilakukan karena pada penelitian ini, akan digunakan material komposit TiO₂- *Graphene* sebagai material semikonduktor. Adapun penelitian sebelumnya mengenai *Graphene*, oleh Junaidi (2013) menggunakan metode reduksi Zn dan *hydrothermal*. Junaidi memvariasikan waktu ultrasonikasi dan temperatur *hydrothermal*-nya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa *graphene* yang disintesis dengan variasi waktu ultrasonikasi dan waktu tahan *hydrothermal* 12 jam memiliki sifat yang terbaik. Semakin lama waktu ultrasonikasi maka akan cenderung membentuk



single layer graphene, dan semakin lama waktu tahan hydrothermal maka cenderung terbentuk *few layer graphene*. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan pemanfaatan larutan dari ekstrak jenis baru dari tumbuhan yaitu dari bunga Geranium. Selain itu, pada penelitian ini akan digunakan semikonduktor berupa komposit TiO_2 - *Graphene* dengan harapan dapat menghasilkan nilai kelistrikan yang lebih baik dari sebelumnya. Adapun untuk mengetahui pengaruh dari komposit *Graphene*- TiO_2 terhadap nilai kelistrikan DSSC ditambahkan variasi komposisi *Graphene* untuk mengetahui komposisi terbaik untuk mendapatkan nilai kelistrikan pada DSSC yang paling maksimal.



~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bahan- bahan Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini, agar dapat berjalan dengan baik dibutuhkan bahan- bahan. Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Serbuk Grafit dengan ukuran 150 μm (kemurnian 99%)
2. Air suling / Aquades (H_2O)
3. Larutan elektrolit Asam Sulfat 98% (H_2SO_4)
4. Es batu
5. Natrium Nitrat (NaNO_3)
6. Kalium permanganat (KMnO_4)
7. Hidrogen peroksida (H_2O_2)
8. Asam Klorida 35% (HCl)
9. Barium Klorida (BaCl_2)
10. Serbuk Zn
11. Iodida/ I_2 (0,127 gr - 0,0005 mol)
12. Kalium Iodida/ KI (0,8 gr - 0,004819 mol)
13. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$
14. Kaca *Fluorine Tin Oxide* (FTO)
(dengan dimensi 2 cm \times 2 cm \times 0.11 cm dan R=10 Ω/sq)
15. 4 gr bubuk Zn (merek dagang Merck)
16. 4 ml NH_4OH
17. 21 ml *ethanol*
18. 4 ml asam asetat (CH_3COOH)
19. 9 gr Serbuk TiO_2 P-25
20. PEG 400 (secukupnya)

3.2 Alat- alat Penelitian

Dalam pelaksanaan penelitian ini, agar dapat berjalan dengan baik dibutuhkan alat- alat. Adapun alat- alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Neraca Analitik (merek dagang Mettler Toledo)



Alat ini digunakan untuk mengukur massa serbuk grafit, KMnO_4 , NaNO_3 , Grafit oksida, serbuk Zn, serbuk TiO_2 dan *graphene*

2. Pipet
Pipet yang digunakan adalah pipet standar untuk mengambil larutan
3. Pengaduk (Spatula)
Digunakan untuk mengaduk larutan dan memindahkan bahan penelitian yang berupa serbuk.
4. *Spin Coater SCS 6800*
Digunakan untuk proses deposisi pasta TiO_2 dan pasta TiO_2 - *graphene* pada kaca FTO
5. Cawan petri
6. Kertas Saring
Digunakan untuk menyaring ampas *dye*.
7. Blender
8. Mesin *Coating Quantacrome*
Untuk melapisi Kaca *Fluorine Tin Oxide* (FTO) dengan *metal target* Pd/Au yang berfungsi sebagai *Counter* Katalis Elektroda
9. *Hot Plate with Magnetic Stirrer*
Alat ini digunakan untuk mencampur dan mengaduk larutan agar homogen serta untuk proses *drying graphene* hasil proses *hydrothermal*.
10. *Furnace* (merek dagang Thermolyne)
Digunakan untuk proses *hydrothermal* dan *drying* pada pembuatan GO dan *graphene*
11. *Autoclave*
Digunakan untuk proses *Hydrothermal*
12. Masker
Digunakan untuk menghindari terhirupnya uap beracun pada saat penelitian
13. Sarung tangan
Digunakan untuk melindungi tangan dari bahan-bahan kimia yang digunakan selama proses di laboratorium
14. Labu Erlenmeyer
Digunakan untuk menaruh larutan



15. *Ice bath*

Digunakan untuk tempat pembuatan grafit oksida

16. *Centrifuge*

Digunakan untuk mengatur memisahkan partikel terdispersi pada saat sintesis grafit oksida

17. *Ultrasonic Cleaner*

Digunakan untuk homogenisasi dan pengelupasan lembaran *graphite oxide* menjadi *graphene oxide*

18. *Gelas Beaker*

Digunakan untuk tempat aktivasi kimia

19. Instrumen Karakterisasi Material

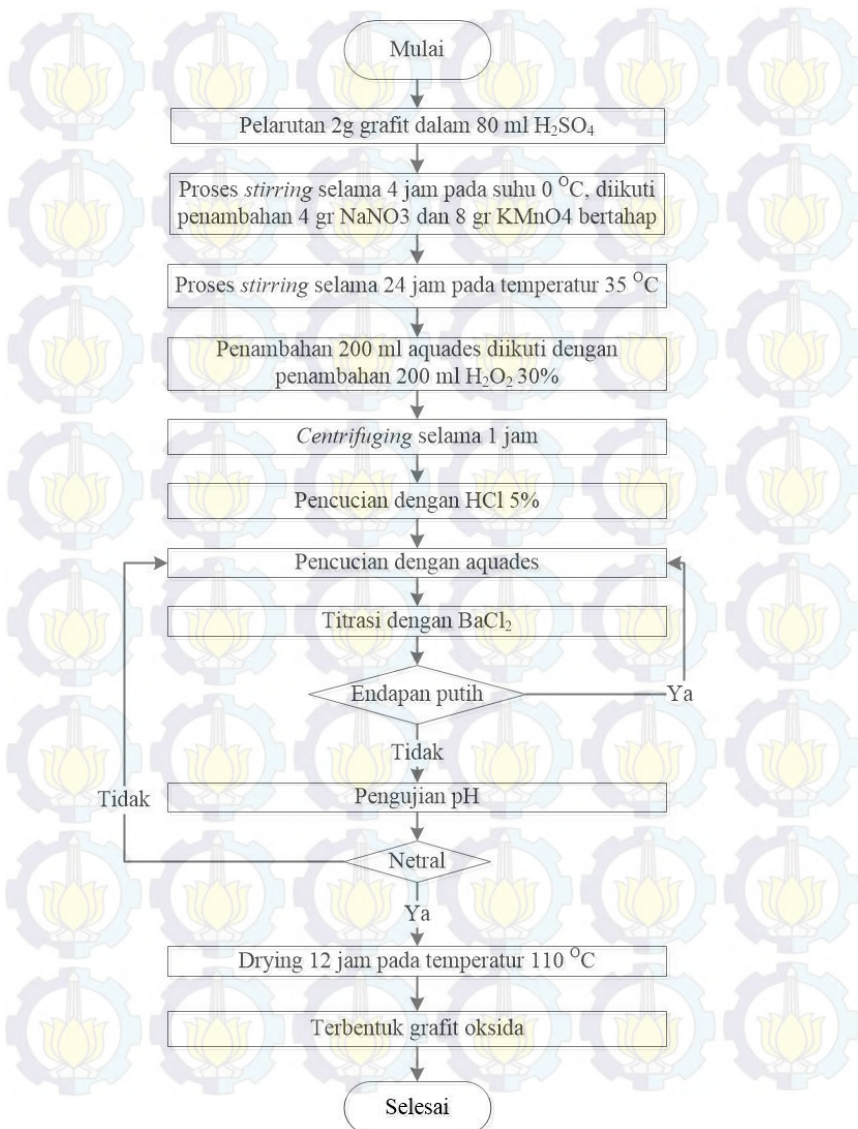
- X-Ray Diffraction* (XRD), untuk mengetahui senyawa yang terkandung dalam sampel
- Scanning electron microscope* (SEM) untuk menganalisis morfologi dan ukuran partikel
- Spektrofotometri UV-Vis

20. Instrumen Pengukuran Karakteristik I-V DSSC yang terdiri dari *I-V Keithley 2602A Instrument Sourcemeter* dan Lampu Xenon dengan intensitas cahaya sebesar 1000 Wm^{-2}



3.3 Diagram Alir Penelitian

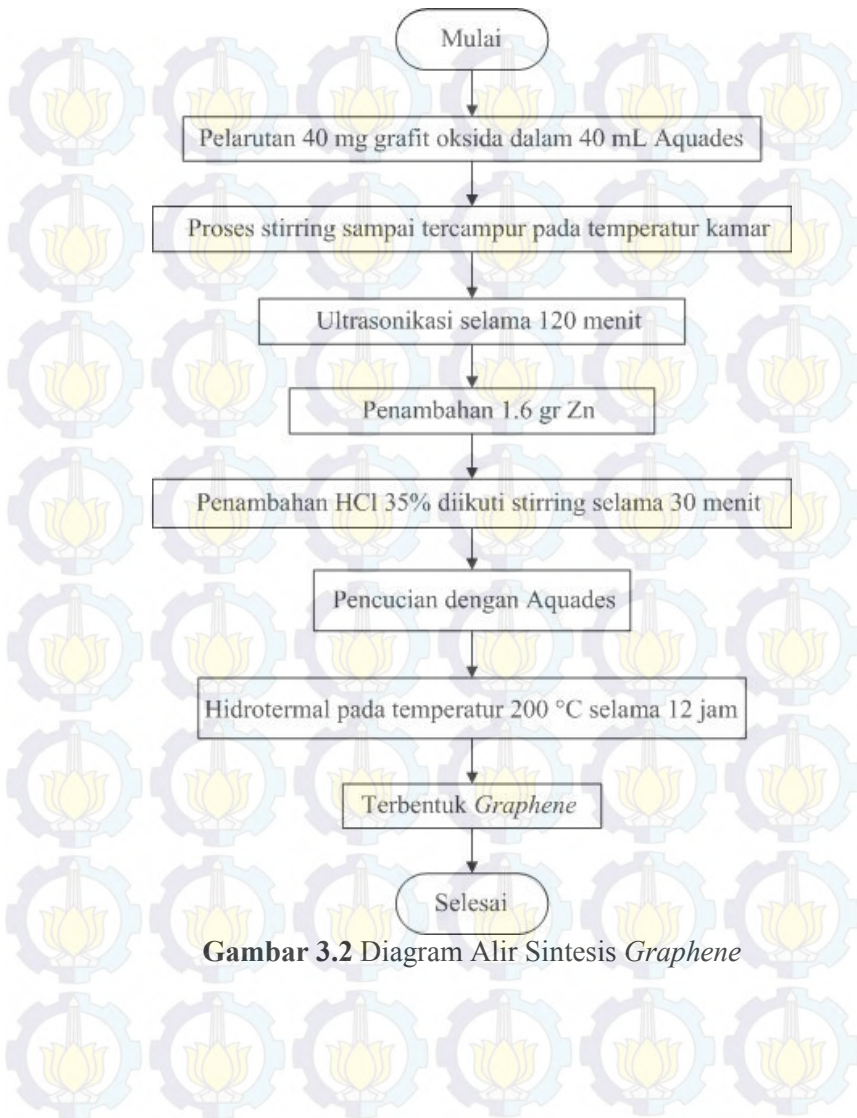
3.3.1 Sintesis Grafit Oksida



Gambar 3.1 Diagram Alir Pembuatan Grafit Oksida

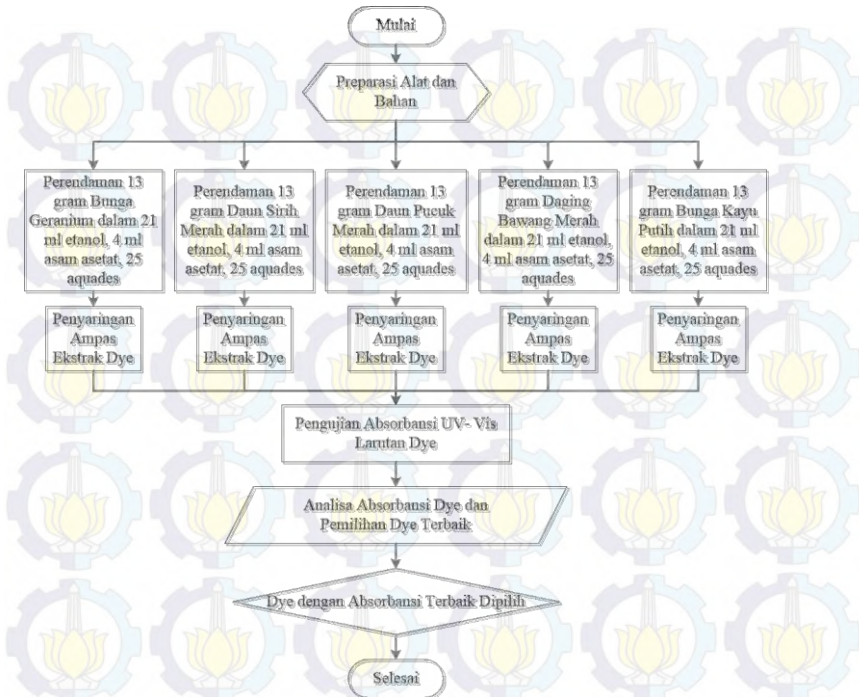


3.3.2 Sintesis *Graphene*



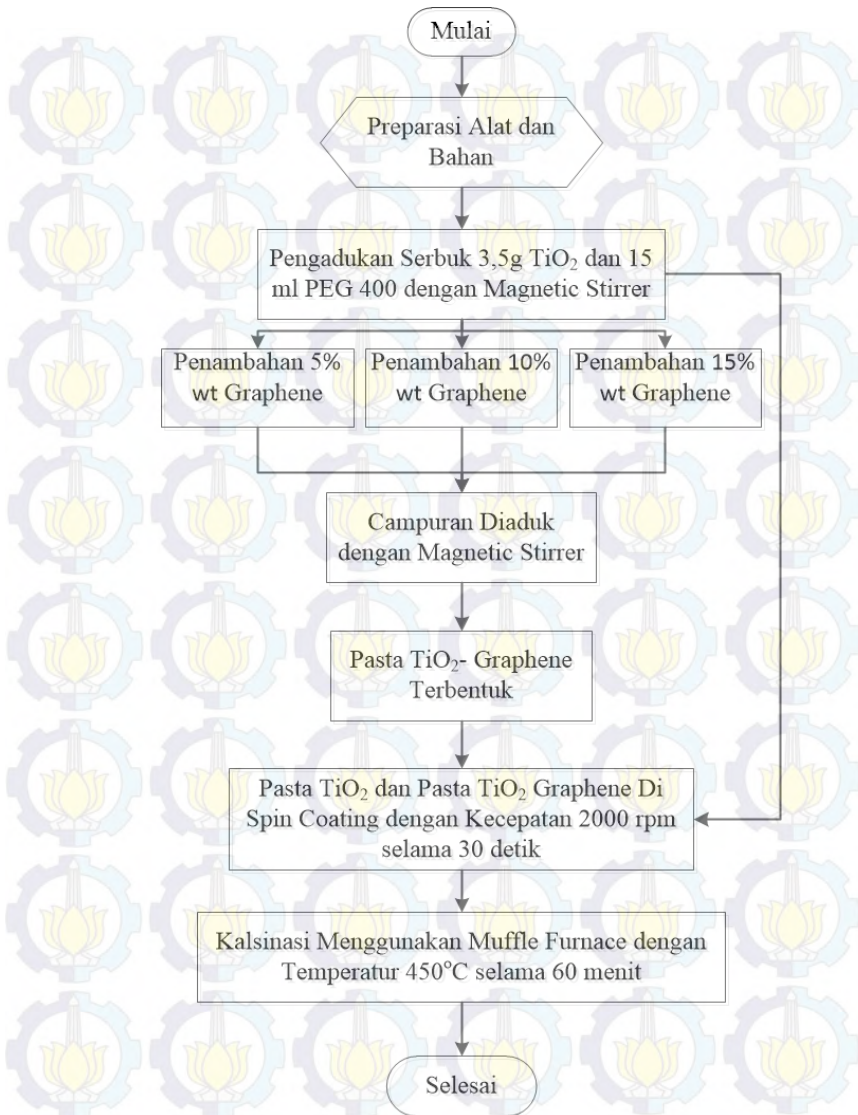
Gambar 3.2 Diagram Alir Sintesis *Graphene*

3.3.3 Diagram Alir Preparasi Dye DSSC



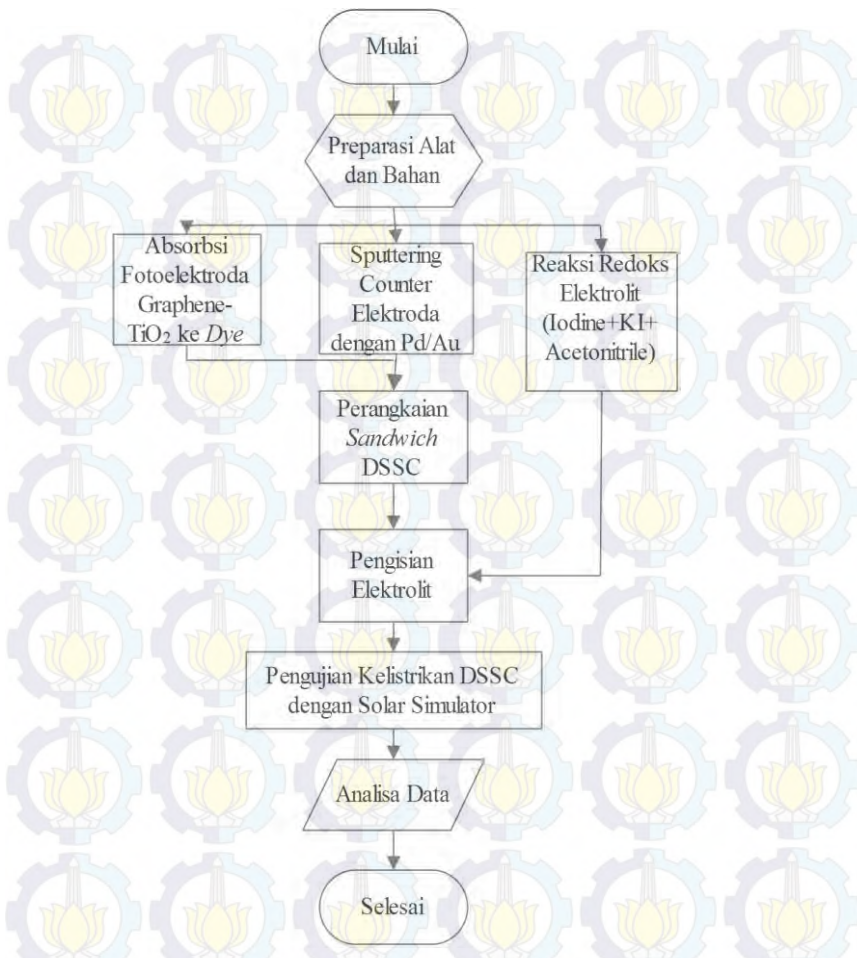
Gambar 3.3 Diagram Alir Preparasi Dye DSSC

3.3.4 Diagram Alir Preparasi Fotoelektroda



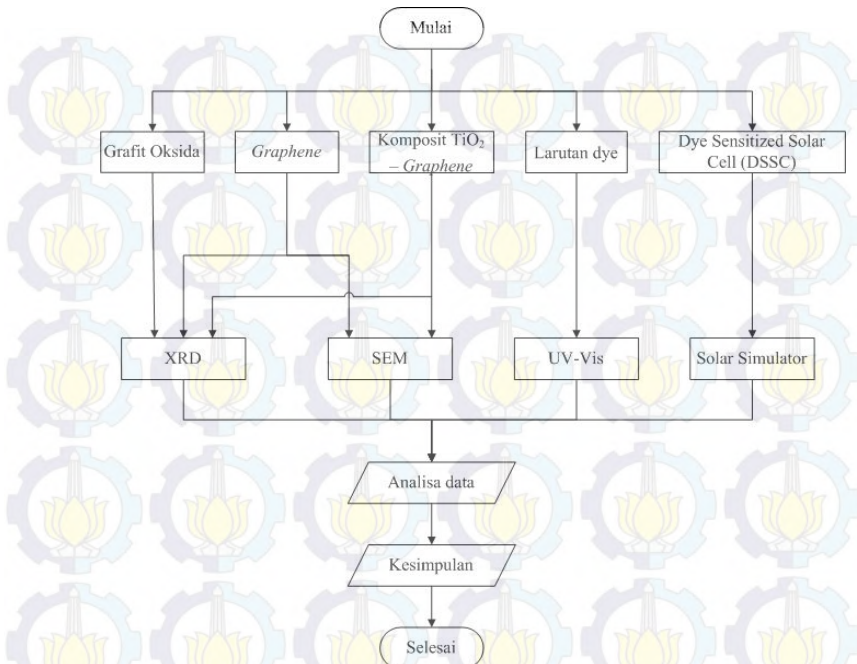
Gambar 3.4 Diagram Alir Preparasi Fotoelektroda DSSC

3.3.5 Diagram Alir Proses Perakitan DSSC



Gambar 3.5 Diagram Alir Proses Perakitan DSSC

3.3.6 Diagram Alir Pengujian



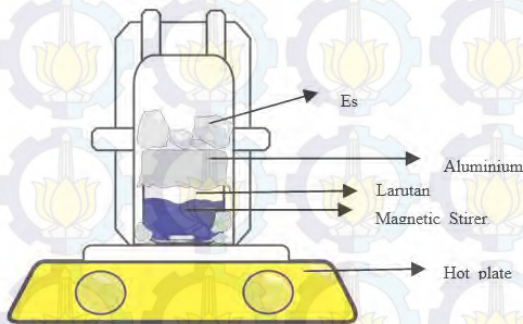
Gambar 3.6 Diagram Alir Proses Pengujian DSSC

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Persiapan Grafit Oksida

Proses sintesis grafit oksida menggunakan modifikasi metode *hummer*. Metode ini menggunakan serbuk grafit, KMnO_4 , NaNO_3 , dan H_2SO_4 sebagai bahan dasar. Proses sintesis diawali dengan menimbang massa grafit sebesar 2 gram. Selanjutnya dilakukan proses *stirring* terhadap 2 gr serbuk grafit dalam 98 ml H_2SO_4 98% selama 4 jam. Pada saat tahap tersebut, dilakukan penambahan 8g KMnO_4 dan 4g NaNO_3 dilakukan secara bertahap setelah *stirring* berjalan selama 1 jam. Sedikit demi sedikit larutan akan berubah warna menjadi hitam kehijauan selama proses penambahan KMnO_4 , kemudian proses *stirring* dilanjutkan. Selama proses *stirring*

tersebut temperatur dijaga dibawah 20°C menggunakan *ice bath* seperti pada Gambar 3.4



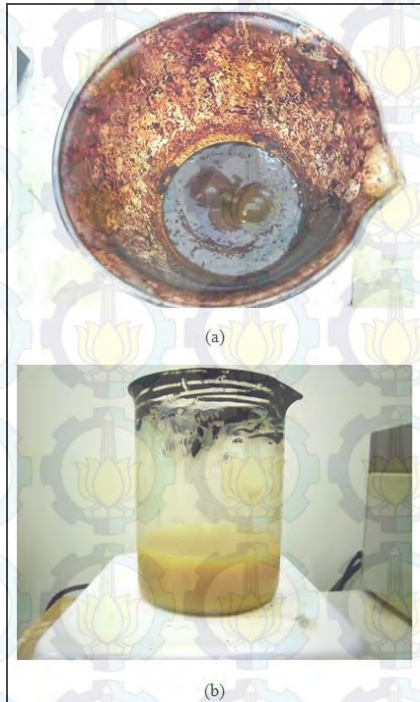
Gambar 3.7 Skema *Ice Bath* pada Proses *Stirring*

Setelah 4 jam *stirring*, larutan dipindahkan dari *ice bath* kemudian *stirring* dilanjutkan selama 24 jam dan temperatur dijaga tetap berada pada 35°C . Setelah 24 jam *stirring* larutan akan berubah menjadi coklat muda. Kemudian proses pencucian dengan 200 ml aquades dan di-*stirring* selama 1 jam. Pada kondisi ini larutan akan berubah warna dari coklat muda menjadi coklat tua.



Gambar 3.8 Proses *Stirring* pada Sintesis Grafit Oksida dengan Temperatur 35°C Selama 24 Jam.

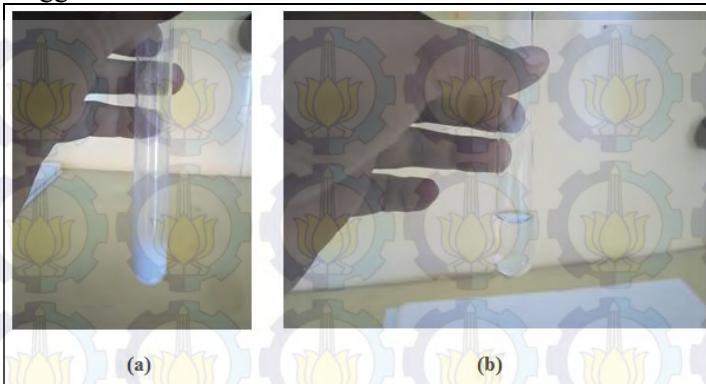
Setelah proses *stirring* selesai proses selanjutnya adalah penambahan 20 ml H_2O_2 30%, larutan berubah warna dari coklat tua menjadi kuning cerah. Untuk memisahkan antara endapan dan cairan dilakukan proses *centrifuge* selama 1 jam dengan kecepatan 3000 rpm agar terpisah antara gel dalam larutan tersebut dengan pelarutnya.



Gambar 3.9 Perbedaan Warna (a) Sebelum dan (b) Sesudah Penambahan H_2O_2

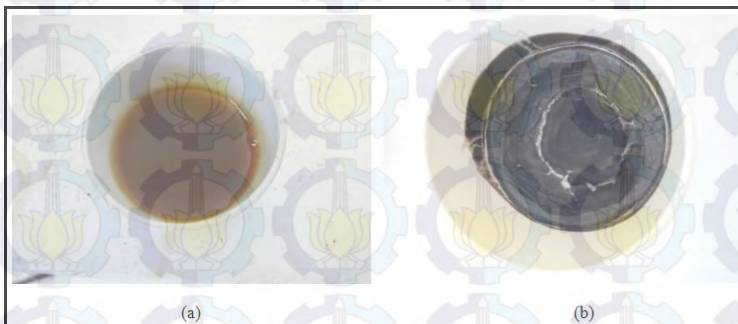
Setelah terpisah antara endapan dan larutan, pencucian dilakukan pada endapan yang diperoleh dengan menggunakan aquades. Pencucian dilakukan sampai tidak ada ion sulfat tersisa dan pH larutan mencapai netral ($\text{pH} = 7$). Untuk mengetahui apakah ion sulfat telah hilang dan pH menjadi

netral dilakukan tritasi dengan menggunakan BaCl_2 1M dan menggunakan kertas lakmus.



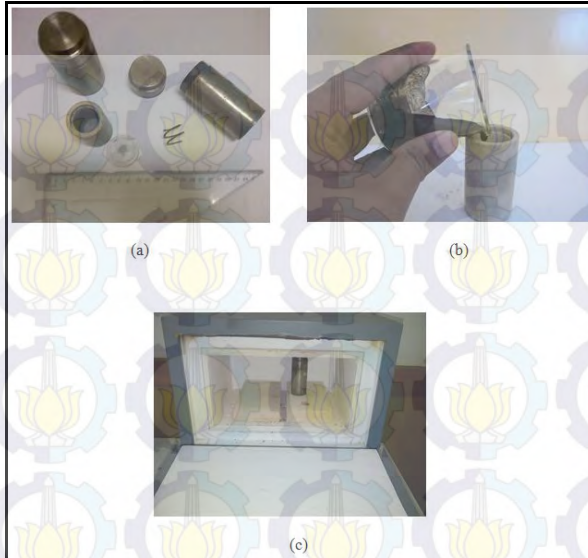
Gambar 3.10 Titrasi dengan Larutan BaCl_2 untuk mengetahui (a) ada atau (b) tidaknya sisa SO_4^{2-}

Apabila ion sulfat telah hilang dan pH telah netral maka dilakukan proses *drying* selama 12 jam dengan temperatur 110°C dalam sebuah *muffle furnace* untuk mendapatkan grafit oksida berbentuk lembaran tipis berwarna kehitaman.



Gambar 3.11 Grafit Oksida Dalam Sebuah Crucible (a) Sebelum *Drying* dan (b) Sesudah *Drying*

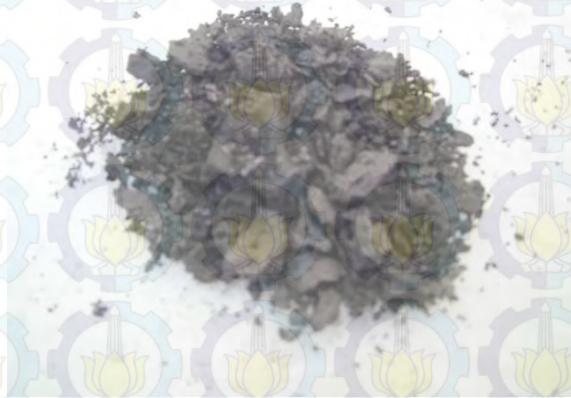
3.4.2 Sintesis *Graphene*



Gambar 3.12 (a) Satu Set *Autoclave* yang digunakan dalam Proses *Hydrothermal* (b) Larutan *Graphene Oxide* dimasukkan ke dalam Teflon dari *Autoclave* (c) *Autoclave* dimasukkan ke dalam *muffle furnace*

Graphene disintesis dengan menggunakan proses *hydrothermal*. 40 mg grafit oksida dilarutkan pada 40 ml aquades dan di-*stirring* selama 1 jam untuk mendapatkan larutan yang homogen. Kemudian dilakukan ultrasonikasi dengan variasi waktu 60 menit, 90 menit dan 120 menit pada larutan tersebut untuk mendapatkan grafit oksida. Setelah proses ultrasonikasi, untuk proses reduksi ditambahkan serbuk Zn 1.6 gr. 10 ml larutan HCl 35% kemudian ditambahkan untuk mendapatkan suasana asam dan kemudian larutan tersebut di-*stirring* selama 30 menit. Setelah 30 menit stiring, 10 ml larutan HCl 35% kembali ditambahkan pada larutan tersebut dan didiamkan beberapa saat untuk menghilangkan Zn yang masih tersisa. Kemudian dicuci dengan menggunakan aquades beberapa kali.

Setelah proses pencucian, endapan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *autoclave* seperti pada Gambar 3.5 kemudian dipanaskan dengan waktu tahan 12 jam dengan temperatur 160°C.



Gambar 3.13 Serpihan *Graphene* Hasil *Hydrothermal*

3.4.3 Preparasi Larutan Elektrolit DSSC

Pengerjaan larutan elektrolit DSSC dilakukan dengan cara melarutkan campuran antara 0.8 gr KI 0.5 M (*Pottassium Iodide*) ke dalam larutan polietilena glikol sebanyak 10 ml, kemudian diaduk secara merata. Selanjutnya, ditambahkan 0.127 gr I₂ (*Iodine*) ke dalam larutan tersebut sampai ketiga bahan tersebut terlarut dengan sempurna. Kemudian simpan dalam botol tertutup.

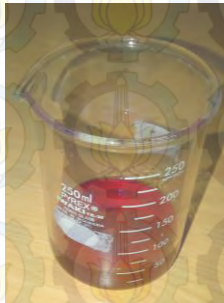
3.4.4 Preparasi Larutan *Dye* Ekstrak Bunga Geranium

Untuk membuat larutan *dye* digunakan ekstrak bunga Geranium dengan konsentrasi 13:50 antara bahan *dye* dengan pelarut. Bahan *dye* sebanyak 13 gr dan pelarut sebanyak 50 ml yang meliputi 21 ml ethanol, 4 ml asam asetat (CH₃COOH), dan 25 ml aquades (Yuliarto dkk, 2010).



Gambar 3.14 Proses Penghalusan Bunga Geranium
Menggunakan *Blender* untuk proses ekstraksinya sebagai *dye*

Ekstrak dibuat dengan menghaluskan bunga geranium menggunakan *blender*. Setelah halus, masing-masing ditambahkan 21 ml ethanol, 4 ml asam asetat (CH_3COOH), dan 25 ml aquades lalu diaduk sampai rata. Kemudian diamkan selama 24 jam untuk mendapatkan hasil ekstraksi yang maksimal. Setelah didiamkan selama 24 jam, lalu disaring dengan menggunakan kassa steril untuk mendapatkan larutan *dye*-nya.



Gambar 3.15 Salah Satu *Dye* Yang Di Buat dari Ekstrak
Bunga Geranium

3.4.5 Fabrikasi Lapisan Semikonduktor

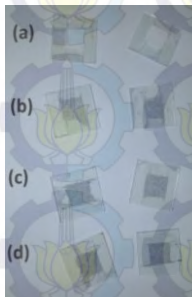
Serbuk TiO_2 P-25 seberat 3,5g dengan berbagai fraksi massa *graphene* (0wt %, 5wt %, 10wt % and 15wt %), dan PEG-400 sebanyak 15 ml dicampur menggunakan *magnetic*

stirrer sampai merata. Selanjutnya, pasta TiO_2 di-*spin coating* pada substrat kaca FTO dengan kecepatan 2000 rpm selama 30 detik.



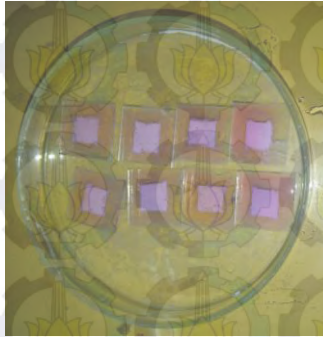
Gambar 3.16 Deposisi Pasta TiO_2 pada Permukaan Kaca FTO Menggunakan *Spin Coater*

Lapisan yang terbentuk tersebut kemudian di kalsinasi pada temperatur 450°C selama satu jam. Setelah itu, lapisan elektroda tersebut dicelupkan pada larutan dye selama 1 hari. Tahap berikutnya, lapisan elektroda tersebut dirangkai dengan kaca FTO yang telah di lapisi dengan Pd/Au.



Gambar 3.17 Hasil Kalsinasi Bagian Fotoelektroda DSSC dengan Komposisi *Graphene* (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, dan (d) 15%

3.4.6 Sensitisasi *Layer Oksida Fluorine Tin-doped Oxide (FTO) Glass*



Gambar 3.18 Proses Sensitisasi *Layer* TiO_2 dengan berbagai komposisi persentase *graphene* dalam larutan *dye*

Untuk sensitisasi *layer* oksida terhadap larutan *dye* ekstrak bunga Geranium dilakukan dengan mencelupkan lapisan fotoelektroda *Fluorine Tin-doped Oxide* (FTO) yang telah dilapisi dengan *layer* TiO_2 dan TiO_2 - *graphene* yang telah dikalsinasi ke dalam larutan *dye*. Selanjutnya, kaca FTO diletakkan dengan posisi *layer* oksida menghadap ke atas. Lalu didiamkan selama 24 jam sehingga larutan *dye* menyerap sempurna ke dalam *layer* oksida. Setelah didiamkan di dalam larutan *dye* tersebut, *layer* TCO dibilas dengan aquades dan *ethanol* dan dikeringkan dengan kertas *tissue*.

3.4.7 *Counter Katalis Elektroda*

Untuk penggunaan *counter* katalis elektroda digunakan *coating* Pd/Au yang di-*sputtering* dengan mesin *coating* untuk didapatkan penyebaran yang merata dari *coating* Pd/Au pada kaca *Fluorine Tin-doped Oxide* (FTO) yang konduktif selama 90 menit.

3.4.8 Perakitan *Dye Sensitized Solar Cell (DSSC)*

Perakitan *Dye Sensitized Solar Cell* dapat dilakukan dengan langkah-langkah seperti berikut:

1. Sebuah kaca FTO dengan *layer* oksida dan sebuah *counter* elektroda Pd/Au ditumpuk dengan permukaan



yang saling berhadapan. Kemudian, kaca FTO disusun membentuk sebuah struktur *sandwich*. Struktur *sandwich* yang dibuat harus dipastikan tidak ada air dan udara yang terperangkap dalam *prototype Dye Sensitized Solar Cell*.

2. Diberikan *offset* pada bagian ujung dari masing-masing elektroda sebesar 0.5 cm untuk kontak elektrik.
3. Kedua bagian pinggiran sel *Dye Sensitized Solar Cell* yang tidak diberi *offset* dijepit dengan penjepit kertas agar *prototype* melekat sempurna.
4. Kemudian diteteskan 2 – 3 tetes larutan elektrolit triiodide dari kedua ujung *offset prototype Dye Sensitized Solar Cell*. Gaya kapilaritas akan menyerap larutan elektrolit ke dalam *layer* oksida. Pastikan larutan elektrolit menyerap sempurna ke seluruh *layer* oksida.
5. *Dye Sensitized Solar Cell* sudah siap untuk diuji kelistrikannya.

3.5 Pengujian

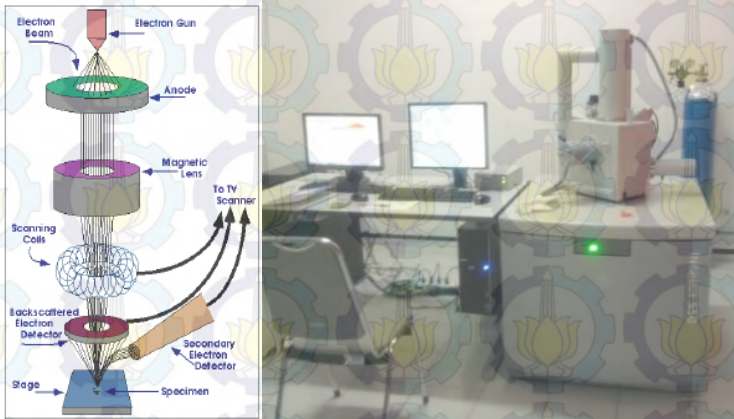
Pada penelitian ini, kebenaran dari teori dibuktikan dengan data. Adapun data pada penelitian ini diperoleh dari pengujian- pengujian sebagai berikut:

3.5.1 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Mikroskop elektron merupakan mikroskop yang memanfaatkan pancaran elektron berenergi tinggi untuk memeriksa objek dalam skala yang sangat kecil. Pengamatan ini memberikan informasi mengenai topografi (jenis permukaan objek), morfologi (bentuk dan ukuran partikel), komposisi (unsur dan senyawa beserta jumlah relatif masing-masing) menggunakan EDS (*Energy Dispersive X-Ray analysis*).

Untuk menghasilkan gambar pancaran elektron dari *electron gun* difokuskan pada *fine probe* yang di *scan* melintasi permukaan spesimen. Pancaran diperkuat dengan adanya koil. Setiap titik spesimen yang ditumbuk elektron membentuk radiasi elektromagnetik. Pancaran elektron yang mengenai permukaan sampel akan dihamburkan dan ditangkap oleh *Back Scatter electron detector (BSE)* dan *secondary*

electron detector. Kemudian hasilnya diterjemahkan dalam bentuk gambar pada display. Dengan adanya BSE maka gambar hasil SEM akan memiliki gradasi warna, bagian berwarna terang tersusun atas material ringan dan bagian yang agak gelap adalah material berat. Mekanisme kerja dan Bentuk Instrumen SEM diperlihatkan pada Gambar 3.6



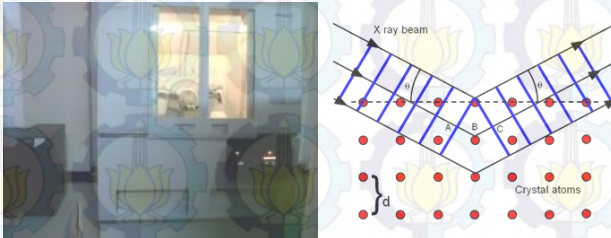
Gambar 3.19 (a) Skema kerja SEM (b) *Scanning Electron Microscopy* (SEM) Inspect S50

Berbagai macam sampel dapat diamati menggunakan SEM, misalnya logam, keramik, plastik, debu, mineral, tulang dan sebagainya. Sampel yang digunakan merupakan material bersifat konduktif, apabila tidak konduktif maka harus dikonduktifkan dengan *carbon tape*. Kualitas gambar yang dihasilkan memiliki perbesaran 100.000 kali. Dengan kata lain, resolusi SEM saat ini mencapai 1.5 nm pada 30 kV.

3.5.2 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (Philips Analytical) pada Gambar 3.7(a) merupakan analisis teknik untuk mengamati hamburan sinar-x dari material kristalin. Setiap material menghasilkan sinar-x karakteristik. Intensitas sinar dan besar sudut hamburan menggambarkan struktur atom kristalin. Untuk mengetahui struktur kristal yang sesuai, data dan grafik hasil

pengujian XRD dicocokkan dengan menggunakan JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standard*).



Gambar 3.20 (a) Instrumen XRD PANalytical (b) Pola Difraksi Sinar-x

Generator tegangan tinggi pada bagian *x-ray tube* berfungsi sebagai pembangkit daya penghasil sinar-x. Sinar-x diarahkan menuju permukaan sampel. Setiap material memiliki susunan atom yang teratur sesuai konfigurasi. Ketika Sinar-x menumbuk sampel, elektron pada kulit terluar akan tereksitasi dan menyebabkan elektron yang hilang akan menempati daerah yang mempunyai tingkat energi lebih tinggi selama transisi dan pancaran radiasi sinar-X terjadi. Sinar-x tersebut akan dihamburkan dan ditangkap oleh *detector* yang kemudian diterjemahkan dalam bentuk kurva yang menggambarkan peak intensitas sinar-x pada sudut tertentu seperti Gambar 3.7(b). Kondisi refleksi sinar-x dirumuskan dengan persamaan 3.1

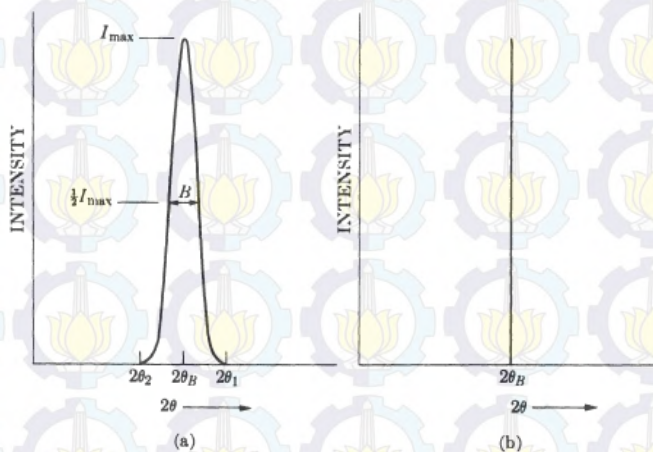
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.1)$$

Karakterisasi material menggunakan XRD menghasilkan beberapa data baik data kualitatif maupun data kuantitatif seperti pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Informasi yang terkandung dalam karakter tinggi, posisi serta lebar dan bentuk puncak difraksi (Pratapa, 2004)

No	Karakter	Informasi dari material	Informasi dari instrument
1	Posisi puncak	• Fasa	• Kesalahan 2θ

	(2 θ)	kristal/identifikasi <ul style="list-style-type: none"> • Struktur kristal • Parameter kisi • Regangan seragam 	<ul style="list-style-type: none"> • Ketidaktepatan penempatan sampel
2	Tinggi puncak (intensitas)	<ul style="list-style-type: none"> • Identifikasi • Komposisi • Hamburan tak koheren • <i>Extinction</i> • <i>Preferred-orientation</i> 	
3	Lebar dan bentuk puncak	<ul style="list-style-type: none"> • Ukuran kristal (bukan partikel atau <i>grain</i>) • Distribusi ukuran 	<ul style="list-style-type: none"> • Duplet radiasi • Divergensi aksial • Kedataran permukaan sampel



Gambar 3.21 Efek Ukuran Kristal Pada Difraksi Sinar-X (Culity, 1956)

Ukuran kristal mempengaruhi pola difraksi sinar-x seperti pada Gambar 3.8. Sedangkan ukuran Kristal yang terbentuk dihitung berdasarkan persamaan *Debye Scherrer* (3.2)

$$D = \frac{0.9 \lambda}{B \cos \theta} \quad (3.2)$$

Dimana D : Ukuran Kristal

λ : Panjang gelombang Cu-K α (1.54060 Å)

B : FWHM (rad)

Stabilitas fasa yang terbentuk pada material dapat diidentifikasi dengan *micro-strain* yang dihitung dengan persamaan 3.3. Fasa yang terbentuk semakin stabil ketika nilai *micro-strain* kecil.

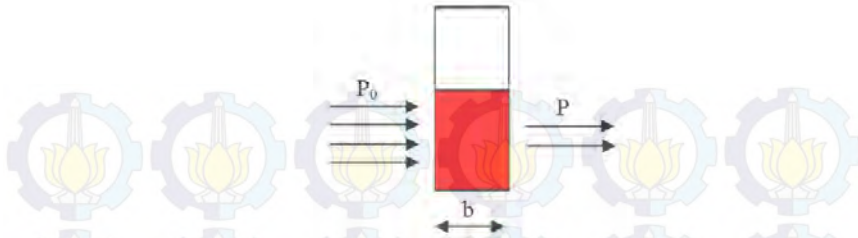
$$\varepsilon = \frac{B}{4} \tan \theta \quad (3.3)$$

3.4.4 Spektrofotometer UV-VIS

Pengujian UV-VIS dilakukan dengan menggunakan sinar tampak atau sinar ultraviolet yang dapat mengakibatkan eksitasi elektron dalam orbital molekul larutan dari tingkat energi dasar ke tingkat energi yang lebih tinggi. Cahaya yang mengenai larutan pada pengujian spektrofotometer UV-VIS akan diteruskan (transmisi) dan akan diserap (absorpsi). Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui absorbansi (daya serap) dari larutan *dye* yang digunakan dalam DSSC. Alat pengujian spektrofotometer UV-VIS seperti Gambar 3.9 tersedia di Jurusan Kimia FMIPA, ITS.



Gambar 3.22 Mesin UV-VIS *Genesys 10S UV-VIS Spectrometer*



Gambar 3.23 Skema Spektrofotometer UV-VIS

Menurut G. Christian (1986), secara umum radiasi energi *input* yang ditembakkan (P_0) akan semakin berkurang ketika ditembakkan ke larutan yang mempunyai konsentrasi untuk mengabsorb radiasi tersebut menjadi radiasi energi *output* dengan kadar yang lebih rendah dari nilai P_0 . Semakin tebal larutan (b) yang dilalui radiasi energi, akan membuat hasil *output* semakin rendah pula. Persentase transmisi larutan merupakan bagian dari cahaya yang diteruskan melalui larutan tersebut.

$$\%T = \frac{P}{P_0} \quad (3.3)$$

dimana:

P : Radiasi energi *output* (nm)

P_0 : Radiasi energi *input* (nm)

$\%T$: Transmisi

Persentase nilai transmisi yang dihasilkan akan berbanding terbalik dengan nilai absorbansi yang dimiliki suatu larutan. Nilai persentase transmisi yang rendah akan menghasilkan nilai absorbansi yang tinggi. Hal ini dikarenakan radiasi energi yang ditembakkan akan diserap oleh larutan yang kemudian diabsorpsi dan mengakibatkan perubahan di dalam molekul larutan tersebut. Nilai absorbansi suatu larutan akan bertambah apabila terjadi pengurangan radiasi energi yang dihasilkan, dengan kata lain nilai absorbansi berbanding lurus terhadap ketebalan konsentrasi larutan.



Radiasi maksimal yang diserap oleh larutan tersebut akan ditunjukkan pada panjang gelombang tertinggi dari nilai absorbansi maksimum dan persentase nilai transmisi minimum yang dihasilkan larutan tersebut. Untuk perhitungan nilai absorbansi digunakan Hukum Lambert-Beer yang dirumuskan seperti pada Persamaan (3.4), Persamaan (3.5), dan Persamaan (3.6).

$$A = a b c \quad (3.4)$$

$$A = -\log T \quad (3.5)$$

$$A = \log \left(\frac{1}{T} \right) \quad (3.6)$$

dimana:

A : Absorbansi

T : Transmisi

a : Absorbtivitas

b : Ketebalan larutan

c : Konsentrasi larutan

3.4.6 Uji Kelistrikan

Pengujian kelistrikan pada prototipe *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) menggunakan alat *Keithley 2606A i-V Measurement*. *Keithley 2606A i-V Measurement* akan mengukur jumlah arus dan besarnya tegangan yang dapat dihantarkan pada sebuah *prototipe Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC), sehingga diperoleh nilai efisiensi paling tinggi dari *prototipe Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC).



Gambar 3.24 Rangkaian Instrumen Pengujian *Keithley 2606A i-V Measurement*

Pengujian dilakukan dengan mengukur arus dan tegangan yang muncul pada DSSC ketika disinari cahaya yang bersumber dari lampu Xenon berintensitas 1000 W/m^2 .

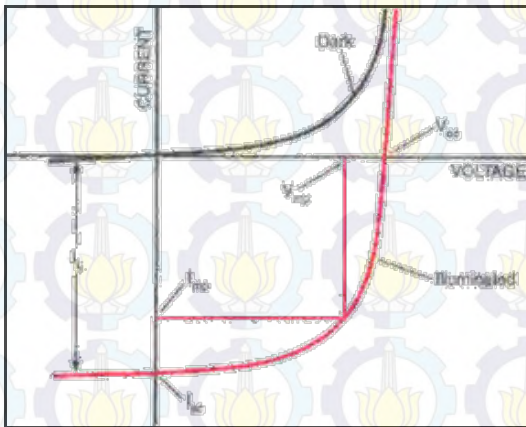


Gambar 3.25 DSSC Diuji Kelistrikkannya Dengan *Keithley i-V measurement*.

Sebelum pengujian dilakukan, terlebih dahulu dilakukan metode kalibrasi dengan cara mengukur tegangan dan arus yang muncul pada DSSC tanpa adanya cahaya (*dark*). Hasil yang ideal untuk *dark* adalah ketika kurva plot hubungan antara arus (i) dan tegangan (V) berpotongan dengan titik $(0,0)$, pada koordinat kurva dengan sumbu-x adalah tegangan

(dalam satuan Volt) dan sumbu-y adalah arus (dalam satuan Ampere).

Ketika DSSC diberi pencahayaan (illuminated), untuk memenuhi hasil pengujian yang baik, maka kurva hubungan I-V tersebut akan “turun” ke daerah dengan nilai sumbu-x positif dan sumbu-y negatif. Adapun ilustrasi kurva karakteristik arus (I)- tegangan (V) pada kondisi *dark* dan *illuminated* dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.26 Karakteristik I-V pada DSSC saat kondisi dark dan illuminated

Untuk menghitung besarnya *Fill Factor* (FF) dan efisiensi *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) dapat digunakan persamaan yang digunakan oleh Chang, dkk (2010) yang ditunjukkan pada Persamaan (3.7), Persamaan (3.8), dan Persamaan (3.9).

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (3.7)$$



$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{in}} \quad (3.8)$$

$$P_{max} = I_{max} \times V_{max} \quad (3.9)$$

Dengan:

FF : *Fill factor* (%)

η : Efisiensi (%)

I_{max} : Arus saat daya maksimal dihasilkan DSSC (mA)

V_{max} : Tegangan saat daya maksimal dihasilkan DSSC (mV)

I_{sc} : Arus *short circuit* (mA)

V_{oc} : Tegangan *open circuit* (mV)

P_{in} : Daya masukan (mW)

P_{max} : Daya maksimal dihasilkan DSSC (mW)



~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

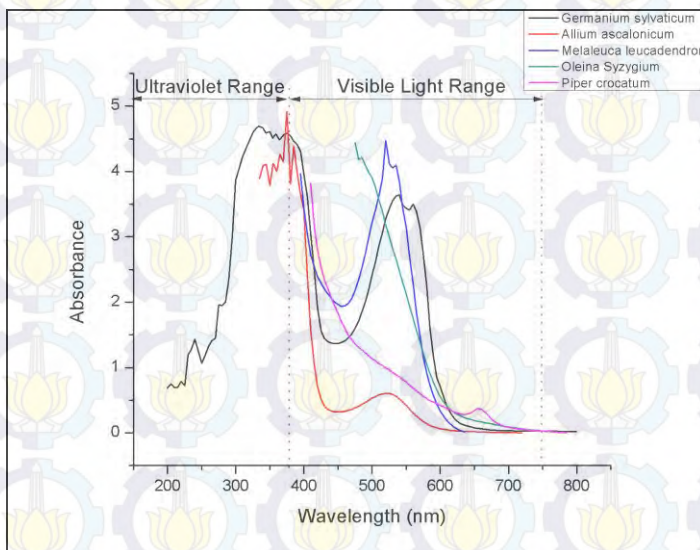
4.1 Hasil Pengukuran Spektrofotometri *Ultraviolet Visible* (UV Vis)

Spektrofotometri UV Vis dilakukan menggunakan *Thermo Genesys 10S UV-VIS Spectrometer* yang terdapat di Laboratorium Fundamental Kimia, Jurusan Kimia, FMIPA ITS terhadap *dye* dengan tujuan untuk mengetahui spektrum absorbansinya terhadap cahaya. Sampel uji yang digunakan pada pengujian ini berupa beberapa kandidat larutan *dye* yang terbuat dari ekstrak bunga geranium (*Geranium sylvaticum*), ekstrak daging bawang merah (*Allium ascalonicum*), bunga pohon kayuputih (*Melaleuca leucadendron*), daun pohon pucuk merah (*Oleina Syzygium*) dan daun sirih merah (*Piper crocatum*) yang telah disaring dengan komposisi ekstrak sebanyak 13 g dan pelarut sebanyak 50 mL yang meliputi 21 mL etanol, 4 mL asam asetat (CH_3COOH), dan 25 mL aquades. Dari proses ekstraksi tersebut, didapatkan berbagai macam *dye* dengan konsentrasi yang sama, yaitu sebesar 0,52 g/mL Hasil dari pengukuran spektrofotometri terhadap berbagai *dye* menggunakan instrumen yang telah disebut di atas berupa data absorbansi dan panjang gelombang, yang kemudian diplot menggunakan *software* OriginPro 8 untuk didapatkan grafik absorbansinya.

Pemilihan jenis tumbuhan yang akan diekstrak didasarkan pada keberadaan pigmen pada tumbuhan yang disebut dengan antosianin. Keberadaan antosianin tersebut dapat diketahui salah satunya dengan warna pada bagian tertentu tumbuhan sebagaimana yang ditunjukkan oleh berbagai kandidat *dye* yang telah disebutkan sebelumnya. Antosianin tersebut berperan sebagai *photosensitizer* yang menyerap cahaya matahari untuk selanjutnya mentransfer dan mengkonversi foton yang terdapat pada cahaya matahari menjadi energi listrik. Oleh karena itu, dalam pemilihan *dye* yang optimal, salah satu pertimbangan utamanya adalah

bagaimana kemampuan absorpsi *dye* tersebut terhadap cahaya. Cahaya yang dipertimbangkan untuk memenuhi kriteria *dye* yang baik merupakan cahaya yang memiliki spektrum cahaya tampak (rentang panjang gelombang cahaya 380- 700 nm).

Dari pengukuran spektrofotometri yang dilakukan pada penelitian ini, didapatkan data berupa panjang gelombang cahaya (*wavelength*) yang dapat diabsorpsi (dalam skala nm), dan intensitas absorbansinya. Data tersebut kemudian diplot sebagai berikut:



Gambar 4.1 Grafik Absorbansi Untuk Berbagai Kandidat *Dye*

Dari grafik di atas, dapat di simpulkan sebagaimana dalam tabel berikut:

Tabel 4.1 Panjang Gelombang dan Absorbansi Puncak Spektrum UV- Vis Untuk Beberapa Kandidat *Dye*

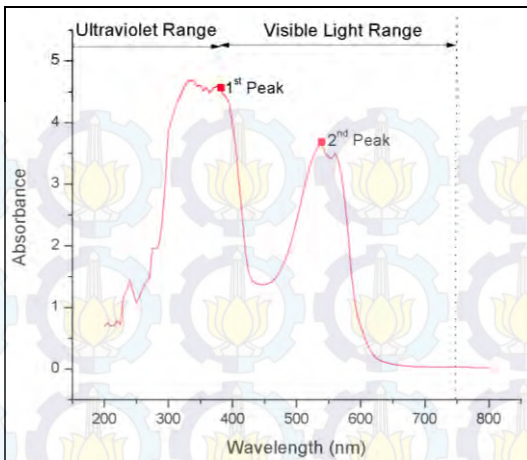
Dye	Puncak (Rentang Cahaya Tampak)		Spektrum Warna
	Wavelength (nm)	Absorbance	
Geranium (<i>Geranium sylvaticum</i>)	380	4,5455	Ungu



Bawang Merah (<i>Allium ascalonicum</i>)	385	4,39	Ungu
Bunga Kayuputih (<i>Melaleuca leucadendron</i>)	520	4,479	Kuning
Daun Pucuk Merah (<i>Oleina Syzygium</i>)	475	4,45	Biru
Daun Sirih Merah (<i>Piper crocatum</i>)	410	3,821	Merah

Pada tabel di atas, dapat diambil kesimpulan bahwa pada rentang panjang gelombang tampak, *dye* dari bunga Geranium dalam memiliki absorbansi tertinggi dengan intensitas sebesar 4,5455 pada panjang gelombang 380 nm. Intensitas yang relatif tinggi dibandingkan dengan kandidat *dye* lainnya menandakan bahwa *dye* dari ekstrak bunga geranium memiliki kemampuan untuk menyerap cahaya matahari yang paling baik dibandingkan dengan kandidat *dye* yang lainnya.

Selain memiliki intensitas yang tertinggi, *dye* dari ekstrak bunga geranium juga memiliki kelebihan yang tidak dimiliki oleh kandidat *dye* yang lain, yaitu memiliki puncak absorbansi kedua yang intensitasnya relatif tinggi. Yang dimaksud dengan puncak absorbansi kedua merupakan puncak yang intensitasnya lebih rendah dibandingkan dengan puncak berintensitas tertinggi, yang berada dalam rentang spektrum cahaya tampak. Adapun secara rinci, spektrum *dye* dari bunga geranium dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.2 Spektrum Absorbansi UV- Vis *Dye* Ekstrak Bunga Geranium

Tabel 4.2 Nilai Panjang Gelombang dan Absorbansi Pada Puncak Spektrum UV- Vis Bunga Geranium

Panjang Gelombang	Absorbansi	Spektrum
380	4.5455	Ungu
540	3.638	Hijau

Sebenarnya, pada beberapa kandidat *dye* yang lain, juga terdapat puncak absorbansi kedua, namun intensitasnya tidak sebaik yang dimiliki oleh geranium. Adapun intensitas puncak kedua spektrum UV-Vis pada berbagai kandidat *dye* dapat dibandingkan melalui tabel di bawah ini.

Tabel 4.3 Perbandingan Panjang Gelombang dan Absorbansi Puncak Kedua Pada Berbagai Kandidat *Dye*

Dye	Puncak Kedua (Rentang Cahaya Tampak)	
	Wavelength (nm)	Absorbance
Geranium	565	3,738



(<i>Geranium sylvaticum</i>)		
Bawang Merah (<i>Allium ascalonicum</i>)	520	0,602
Bunga Kayuputih (<i>Melaleuca leucadendron</i>)	395	3,966
Daun Pucuk Merah (<i>Oleina Syzygium</i>)	-	-
Daun Sirih Merah (<i>Piper crocatum</i>)	655	0,37

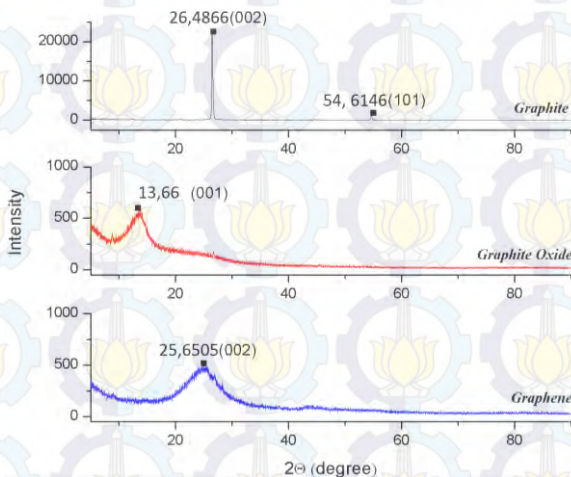
Pengaruh dari adanya rentang kedua yang relatif tinggi pada *dye* dari ekstrak bunga geranium tersebut adalah semakin banyak spektrum warna pada cahaya yang terabsorbsi oleh *dye*. Atas dasar yang telah dijelaskan diatas, maka pada penelitian ini digunakan *dye* dari ekstrak dari bunga geranium.

Apabila dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan di Laboratorium Kimia Material, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS, data UV- Vis memiliki absorbansi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang telah dilakukan oleh Nafi (2013), Prasetya (2012), dan Nadeak (2012). Nafi (2013) melaporkan bahwa *dye* dari ekstrak daging terung belanda (*Solanum betaceum*) memiliki absorbansi sebesar 3,720 pada *wavelength* 495 nm. Prasetya (2012) melaporkan bahwa *dye* dari ekstrak daging terung belanda (*Solanum betaceum*) memiliki absorbansi sebesar 4,036 pada *wavelength* 499 nm. Nadeak (2012) melaporkan bahwa *dye* dari ekstrak buah naga merah (*Hylocereus polyrhizus*) memiliki absorbansi sebesar 3,300 pada *wavelength* 538 nm.

4.2 Hasil X-ray Diffractometry (XRD)

X-ray diffractometry (XRD) dilakukan untuk mengamati struktur grafit, grafit oksida dan *graphene* serta mengamati struktur yang dihasilkan pada permukaan DSSC. Pada penelitian ini, pengujian XRD dilakukan dengan

menggunakan *X-ray Diffractometer Philips Analytical* yang terdapat di Laboratorium Karakterisasi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, FTI ITS. Pengamatan menggunakan XRD dilakukan pada sudut $2\theta = 5^\circ - 90^\circ$ dengan $\lambda \text{ Cu-K}\alpha$ 1,54060 Å. Hasil XRD dari grafit, grafit oksida, dan *graphene* dapat dibandingkan dari gambar di bawah ini:



Gambar 4.3 Hasil XRD untuk Grafit, Grafit Oksida, dan *Graphene*.

Tabel 4.4 Data Puncak Tertinggi Untuk Material Grafit, Grafit Oksida dan *Graphene*

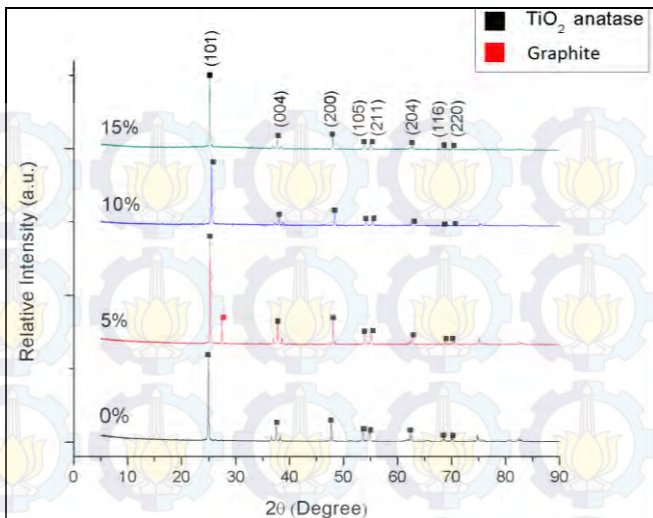
Sampel	2θ (°)	FWHM	d-spacing (Å)
Grafit	26,4866	0,1004	3,36527
Grafit Oksida	13,66	2,2059	7,4168
Graphene	25,6505	0,4015	3,47302

Analisa puncak tertinggi dari ketiga material di atas sebagaimana disajikan pada tabel didapatkan dengan menggunakan *software HighScore*. Dari gambar 4.2 dapat dilihat untuk material grafit, hasil difraksinya tertinggi terdapat pada $2\theta = 26,4866^\circ$ dengan d_{spacing} sebesar 3,36527 Å, puncak tersebut apabila grafit telah teroksidasi seluruhnya menjadi grafit oksida tidak tampak kembali dan muncul puncak baru pada $2\theta = 13,66^\circ$ yang memiliki $d_{\text{spacing}} = 7,4168$



Å sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.2 (b). Dengan d-spacing grafit oksida yang lebih lebar daripada grafit, dapat ditunjukkan adanya gugus- gugus fungsi oksigen dalam grafit oksida yang teridentifikasi pada puncak $2\theta = 13.66^\circ$ dengan d-spacing = 7.4168 Å. Puncak grafit oksida tersebut berubah lagi dengan tereduksi dan terkelupasnya lapisan- lapisan grafit oksida menjadi *graphene*. Puncak material *graphene* teridentifikasi pada puncak $2\theta = 25.65$ dengan d-spacing = 3,473Å. Nilai d-spacing yang lebih kecil dibanding grafit oksida menunjukkan bahwa grafit oksida telah tereduksi menjadi *graphene*. Selain itu nilai d-spacing *graphene* yang lebih besar daripada grafit mengindikasikan bahwa telah terjadi pengelupasan lapisan grafit. (Hae-Mi, 2010).

Pengujian XRD pada DSSC dilakukan dengan menggunakan sampel lapisan Titanium Dioksida (TiO_2) yang telah terdeposisi di kaca konduktif FTO. Pengujian terhadap DSSC dimaksudkan untuk mengamati fasa dan struktur yang terbentuk pada elektroda kerja DSSC yang terdiri dari material semikonduktor TiO_2 yang dikompositkan dengan berbagai variasi persentase *graphene*. Variasi *graphene* yang digunakan pada penelitian ini antara lain: 0%, 5%, 10%, 15%. Hasil pengujian XRD untuk berbagai variasi antara lain sebagai berikut:



Gambar 4.4 Hasil XRD untuk TiO₂- 0% *Graphene*, 5% *Graphene*, 10% *Graphene*, dan 15% *Graphene*.

Dari gambar 4.5 dapat dibandingkan hasil XRD dari berbagai variasi DSSC. Pada variasi 0%, atau dengan kata lain TiO₂ murni, dapat dianalisa fasa TiO₂ yang terbentuk adalah fasa *anatase*. Fasa *anatase* dapat diketahui dengan mencocokkan data yang didapat menggunakan standar ICDD nomor 01-070-7348. Penggunaan TiO₂ nanopartikel fasa *anatase* pada DSSC sangat potensial untuk mencapai efisiensi lebih tinggi dalam mengubah cahaya menjadi listrik karena mempunyai kemampuan fotoaktif yang tinggi. Fasa *anatase* pada TiO₂ memiliki aktivitas fotokatalisis yang lebih tinggi dibandingkan dengan fasa *rutile* dan *brookite*. Fotokatalisis adalah suatu proses yang dibantu oleh adanya cahaya dan material katalis (Ekasari dan Yudoyono, 2013).

Yang perlu menjadi catatan di sini adalah antara 0%, 10%, 15% tidak ada perbedaan signifikan pada data XRD-nya. Perbedaan seharusnya timbul karena pada 10% dan 15% terdapat penambahan *graphene* yang seharusnya berdampak pada munculnya puncak difraksi *graphene* pada data XRD. Namun, fenomena tersebut tidak terjadi, karena salah satunya

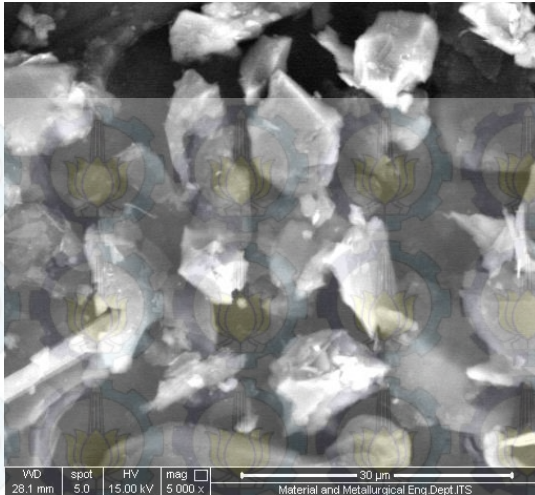


karena material *graphene* dalam campuran TiO_2 - *graphene* kristalinitasnya lebih rendah dengan kristalinitas TiO_2 , karena *graphene* bersifat *amorf* (tidak memiliki struktur kristal), sehingga ketika didifraksi dengan sinar x, tidak memunculkan puncak pada data difraksi XRD sebagaimana yang telah dilaporkan oleh N.R. Khalid et. al. (2014) pada kompositisasi *Graphene* dengan TiO_2 , puncak *graphene* pada XRD dapat tidak muncul karena karakteristik puncak *graphene* pada posisi $25,9^\circ$ yang memiliki intensitas yang relatif lemah dan mengalami *overlap* dengan puncak TiO_2 anatase pada $25,4^\circ$ yang memiliki intensitas jauh lebih tinggi daripada puncak *graphene* tersebut.

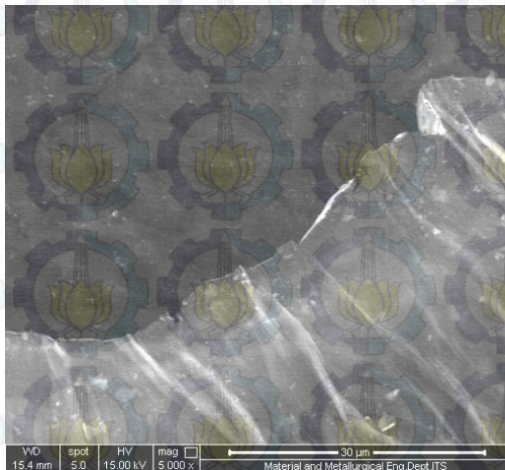
Selain itu, pada gambar 4.5 (b) terdapat puncak pada data XRD. Puncak tersebut bukanlah puncak untuk material *graphene* karena posisinya berada pada 2θ 27.4643 dan *d-spacing* sebesar 3.24496 Å, sehingga dalam kata lain dapat disimpulkan bahwa puncak tersebut adalah puncak untuk material grafit. Grafit tersebut dapat muncul karena proses oksidasi, reduksi, ultrasonikasi ataupun hidrotermal yang kurang cermat pada proses sintesis *graphene*, sehingga reaksi yang diharapkan berjalan belum sesuai dengan yang diharapkan.

4.3 Hasil Pengamatan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

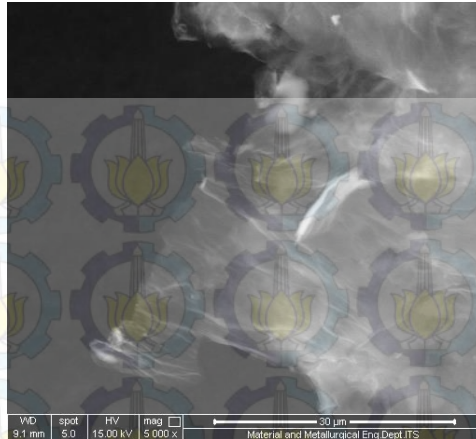
Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui apakah proses sintesis material *graphene* yang dilakukan berhasil dengan mengamati morfologi dari material *graphene* yang dibandingkan dengan grafit, grafit oksida, dan proses sintesis *graphene* yang telah dilakukan sebelumnya. Pengamatan terhadap morfologi ini dilakukan menggunakan instrumen SEM *FEI Inspect S50* yang terdapat di Laboratorium Karakterisasi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, FTI ITS. Hasil SEM dari grafit, grafit oksida, dan *graphene* dapat dibandingkan dari gambar di bawah ini



Gambar 4.5 Morfologi Grafit Diamati dengan SEM
Perbesaran 5000x



Gambar 4.6 Morfologi Grafit Oksida Diamati dengan SEM
Perbesaran 5000x

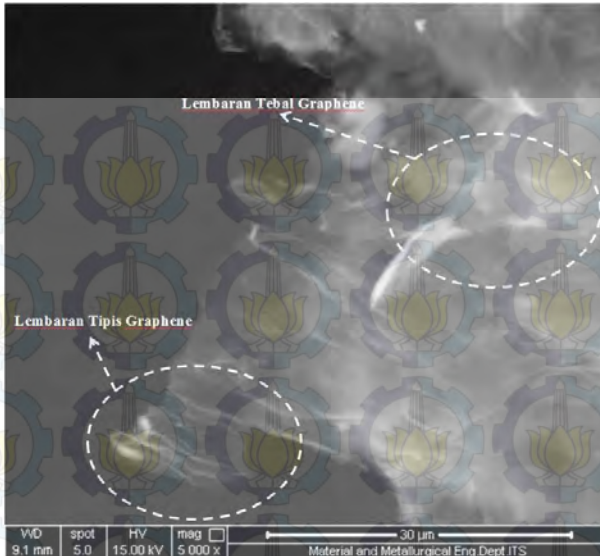


Gambar 4.7 Morfologi *graphene* diamati dengan SEM perbesaran 5000x

Dari Gambar 4.6 sampai 4.8 dapat diamati perubahan morfologi selama proses sintesis *graphene*. Pada awal sebelum proses sintesis, grafit yang digunakan sebagai bahan baku sintesis adalah berbentuk serbuk. Grafit merupakan tumpukan dari lembaran- lembaran tipis *graphene* sehingga ketika diamati dengan SEM, morfologi yang didapatkan berupa serpihan- serpihan yang tebal sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.6.

Proses oksidasi yang dialami grafit selanjutnya dalam proses sintesis, menghasilkan grafit oksida yang morfologinya diamati dengan SEM tidak jauh berbeda dengan grafit, tebal sebagaimana terlihat pada gambar 4.7. Namun demikian, karena *drying* yang dilakukan setelah proses oksidasi grafit menghasilkan grafit oksida berbentuk lembaran, morfologi *flake* yang ada pada grafit tidak lagi ditemui pada grafit oksida.

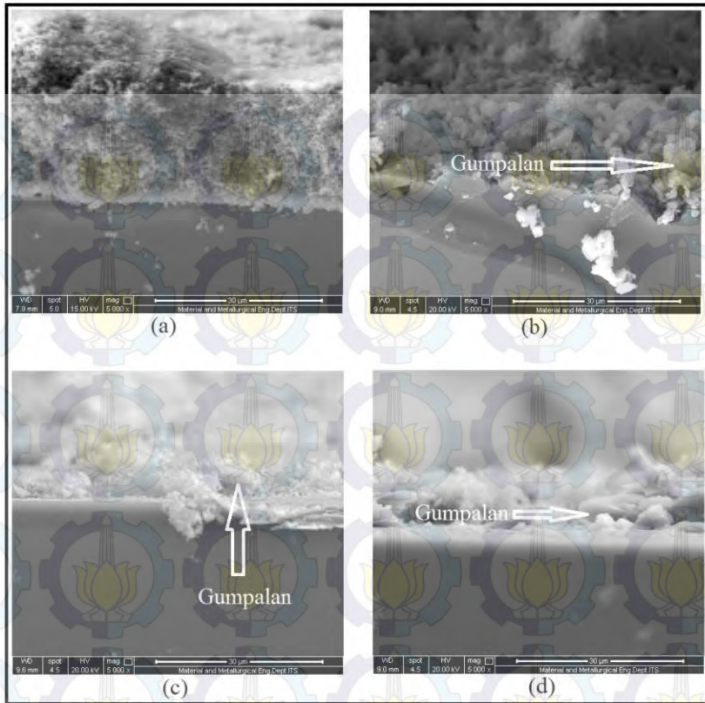
Seiring dengan proses sintesis yang berjalan, proses reduksi, ultrasonikasi dan hidrotermal yang dilakukan mendapatkan *graphene* sebagai hasil akhir yang strukturnya berupa lembaran tipis transparan karena terkelupasnya lapisan- lapisan tebal grafit selama proses sintesis sebagaimana terlihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Lembaran Tebal dan Tipis pada Graphene
Diamati dengan SEM Menggunakan Perbesaran 5000x

Lembaran tebal *graphene* yang terdapat pada gambar di atas merupakan lembaran tipis *graphene* yang bertumpuk dan terlipat. Salah satu parameter dari berhasilnya proses sintesis *graphene* adalah terbentuknya lembaran tipis pada *graphene* yang tidak terdapat pada grafit dan grafit oksida, karena dari gambar 4.9 dapat diamati morfologi tersebut, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses sintesis *graphene* pada penelitian ini telah berhasil dilakukan (Pradesar, 2014)

Pengamatan SEM pada DSSC bertujuan untuk melihat dan membandingkan morfologi material semikonduktor sebelum dan sesudah dikompositkan dengan *graphene*. Hasil SEM dari DSSC antara lain sebagai berikut:



Gambar 4.9 Morfologi *Cross-sectional* DSSC (a) 0%, (b) 5% , (c) 10%, (d) 15%

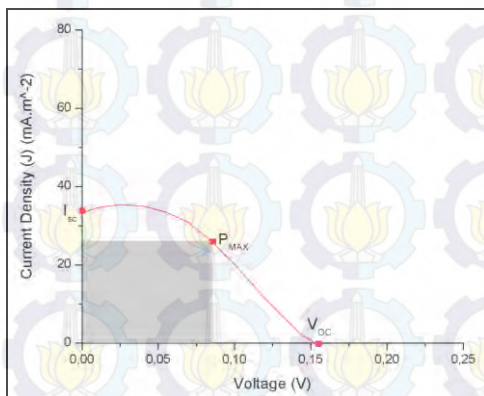
Dari morfologi di atas dapat kita ketahui bahwa dengan penambahan *graphene* dalam TiO_2 dapat menimbulkan gumpalan pada TiO_2 . Gumpalan (atau disebut juga sebagai aglomerat) tersebut dapat muncul karena pada saat pencampuran TiO_2 dengan *graphene* yang menggunakan pelarut larutan Polietilena Glikol, proses pencampuran basah yang terjadi tidak berlangsung secara merata. Akibat dari fenomena tersebut, partikel- partikel partikel-partikel yang memiliki muatan yang sama cenderung untuk berkumpul menjadi satu. Adapun karena pada penelitian ini ukuran partikel dan persentase massa TiO_2 lebih dominan daripada *graphene*, maka partikel tersebut memiliki kecenderungan yang lebih besar untuk mengalami aglomerasi

(penggumpalan). Analisa tersebut didasarkan oleh penelitian yang telah dilaporkan oleh Widyastuti dkk. (2008)

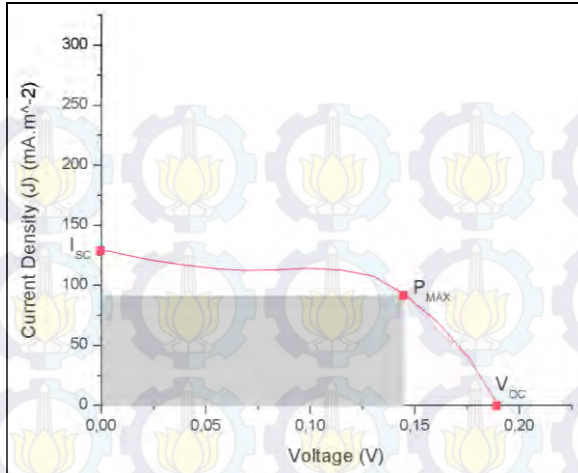
Selain analisa di atas, yang perlu menjadi perhatian lain pada citra SEM di atas terlihat tidak ada material *graphene* yang terlihat. Hal tersebut dapat terjadi karena lembaran tipis *graphene* yang bersifat rapuh pada saat pencampuran, pecah menjadi dimensi yang lebih kecil lagi dan tertutupi oleh lapisan TiO_2 yang perbandingan massanya jauh lebih banyak dan lebih kristalin daripada struktur material *graphene* tersebut.

4.4 Hasil Pengukuran Sifat Kelistrikan DSSC

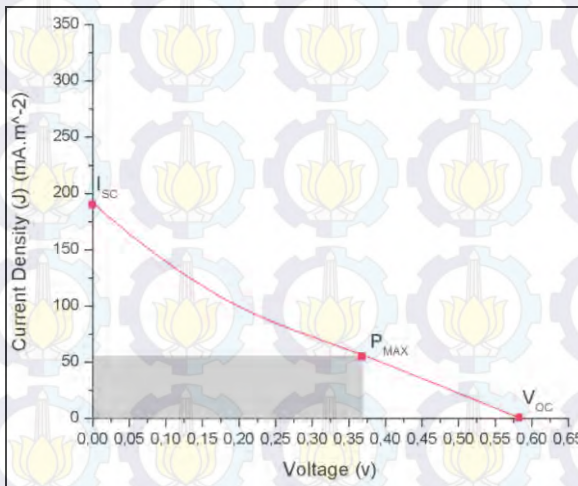
Pengujian sifat kelistrikan DSSC dilakukan dengan menggunakan *Keithley 2606A i-V Measurement* di Laboratorium Material dan Energi, FMIPA UNS. Pengukuran dilakukan untuk mengetahui *electrical properties* dari DSSC yang diketahui dari nilai I_{SC} , V_{OC} , *Fill Factor* (FF), dan Efisiensi (η) dari DSSC. Nilai- nilai tersebut dapat diketahui melalui kurva tegangan (V) dan *current density* (J) yang didapatkan dari plot terhadap data yang dikeluarkan oleh alat. Adapun kurva J-V untuk masing- masing variasi adalah sebagai berikut:



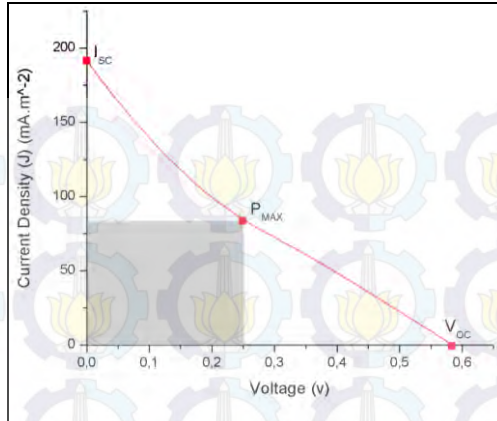
Gambar 4.10 Plot Kurva J-V untuk 0% *Graphene*



Gambar 4.11 Plot Kurva J-V untuk 5% Graphene

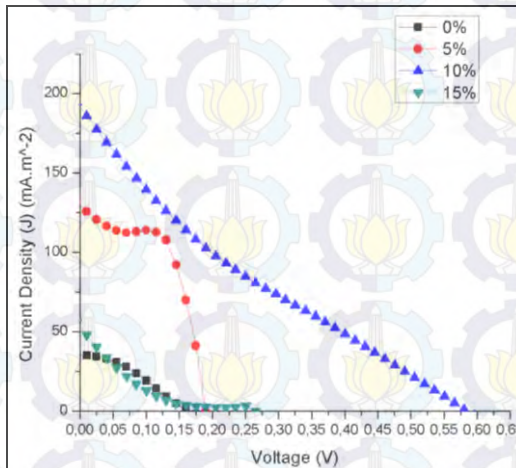


Gambar 4.12 Plot Kurva J-V untuk 10% Graphene



Gambar 4.13 Plot Kurva J-V untuk 15% Graphene

Untuk memudahkan dalam membandingkan keempat kurva tersebut, maka keempat kurva tersebut dapat di plot dalam satu bidang sebagai berikut:



Gambar 4.14 Perbandingan Kurva Untuk Keempat Variasi

Dari kurva- kurva di atas, dapat diketahui karakteristik unjuk kerjanya dengan perhitungan. Adapun setelah rekapitulasinya antara lain sebagai berikut:



Tabel 4.5 Photovoltaics Properties DSSC dengan Berbagai Komposisi Graphene dalam TiO₂

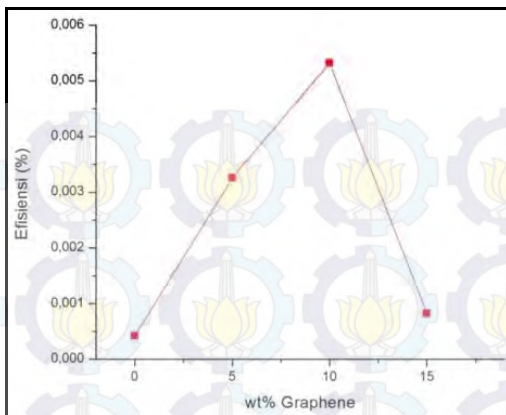
Sampel	I _{sc} (A)	V _{oc} (mV)	P _{max} (W)	FF	η (%)
0%	0,0073	160	4,21 x 10 ⁻⁴	0,36	0,00042
5%	0,0265	189,839	32,6 x 10 ⁻⁴	0,65	0,00326
10%	0,01305	595,198	52,3 x 10 ⁻⁴	0,69	0,00532
15%	0,00509	265,259	8,15 x 10 ⁻⁴	0,60	0,00082

Dari data di atas dapat diketahui bahwa nilai efisiensi maksimal dapat dicapai dengan menambahkan 10%wt *graphene* dalam TiO₂. Nilai ini apabila dibandingkan dengan hasil penelitian yang pernah dilaporkan sebelumnya antara lain sebagai berikut:

Tabel 4.6 Perbandingan Efisiensi Berbagai Jenis DSSC

Peneliti	Tahun Penelitian	Material Elektroda Kerja	Dye	η (%)
<u>Nafi</u>	2013	TiO ₂	Ekstrak Daging Buah Terong Belanda	0,0462
<u>Fang, dkk.</u>	2014	<i>Graphene</i> - TiO ₂	N719	7.02±0.06
<u>Agustini, dkk.</u>	2013	TiO ₂ (25%wt <i>Anatase</i> , 75%wt <i>Rutile</i>)	<i>Rhoeo spathacea</i>	0,002
<u>Pradana</u>	2015	TiO ₂ – 10wt% <i>Graphene</i>	<i>Germanium sylvaticum</i>	0,00532

Dari data pada tabel 4.5 juga dapat diketahui bahwa dengan penambahan *graphene* dari 0% sampai 10% akan meningkatkan efisiensi DSSC, hingga pada penambahan 15% nilai efisiensi tersebut merosot, walaupun nilainya masih lebih baik di bandingkan dengan 0%. Apabila digambarkan trennya ke dalam sebuah grafik antara lain sebagai berikut:



Gambar 4.15 Tren Penambahan *Graphene* terhadap Efisiensi pada DSSC

Tren di atas juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Fang (2014), yang mengkompositkan *graphene hydrosol* dengan TiO_2 menggunakan *dye* N719. Fenomena tersebut dapat terjadi karena pada kompositisasi TiO_2 dengan *graphene*, *graphene* berperan sebagai jembatan dari lapisan TiO_2 yang bersifat *porous*. Dengan semakin meningkatnya persentase *graphene* dalam TiO_2 , dapat meningkatkan *specific surface area* lapisan TiO_2 meningkat, sehingga dampaknya dapat meningkatkan kemampuan elektroda kerja dalam mengabsorpsi *dye*. Akhirnya cahaya matahari yang ditangkap *dye* akan lebih banyak, dan efisiensi dari DSSC akan semakin meningkat pula. Namun demikian, penambahan tersebut memiliki batas maksimal persentase *graphene* yang ditambahkan, karena apabila melewati batas maksimal tersebut, partikel *graphene* akan teragregasi dan menutupi permukaan TiO_2 sehingga *specific surface area*-nya menurun. Dampaknya, kemampuan elektroda kerja dalam menyerap *dye* akan menurun juga, sehingga kemampuannya dalam menyerap cahaya matahari menurun dan nilai efisiensinya akan semakin menurun pula.

Selain dari segi penyerapan *dye*, *graphene* dalam TiO_2 juga dapat berperan sebagai penghubung pada struktur TiO_2



yang *porous*. Dengan adanya *graphene* dalam TiO_2 , muatan dari *dye* dapat ditangkap oleh *graphene* dan secara cepat dapat diteruskan dengan cepat ke partikel TiO_2 yang selanjutnya. Fenomena tersebut menyebabkan jarak penghantaran *charge* menjadi lebih pendek sehingga J_{sc} dapat ditingkatkan. Namun apabila melebihi batas maksimum penambahannya, *graphene* dapat menutupi permukaan TiO_2 . Karena menutupi permukaan partikel TiO_2 , maka proses absorpsi *dye* pada partikel TiO_2 terhalang oleh *graphene* yang bersifat hidrofobik, sehingga akibatnya akan mengganggu penghantaran *charge* dari satu partikel TiO_2 ke partikel yang lain, hal tersebut dapat membuat rekombinasi *charge* tidak dapat dikendalikan, dan *short circuit* akan dengan mudah terjadi. Apabila hal yang seperti demikian terjadi, maka secara otomatis nilai efisiensi yang didapatkan DSSC akan semakin menurun. (Fang, 2014)

Efisiensi yang dihasilkan pada penelitian ini nilainya masih lebih kecil apabila dibandingkan dengan penelitian lainnya yang juga menggunakan *dye* organik, misalnya yang dilaporkan oleh Chien dan Hsu (2013) dengan menggunakan *dye* kubis merah (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*) didapatkan nilai efisiensi maksimum sebesar $1.184 \pm 0.051\%$. Adapun penyebab dari fenomena tersebut dikarenakan adanya aglomerat (gumpalan) pada pasta TiO_2 - *graphene* yang dideposisikan ke kaca FTO. Gumpalan tersebut mengakibatkan ukuran partikel TiO_2 pada DSSC meningkat, sehingga luas permukaan partikel yang mengalami kontak dengan *dye* menjadi menurun.

Nilai efisiensi yang didapatkan pada penelitian ini sendiri apabila di bandingkan dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan di Laboratorium Kimia Material, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS hasilnya berbeda jauh dengan nilai efisiensi maksimal yang lebih kecil. Prasetya (2012) melaporkan bahwa efisiensi maksimal yang didapatkan sebesar 0,15% kemudian Nadeak (2012) melaporkan bahwa efisiensi maksimal yang didapatkan adalah sebesar 0,089% dan Nafi (2013) melaporkan efisiensi yang didapatkan adalah sebesar 0,0469%. Hasil efisiensi yang didapatkan tersebut merupakan hasil pengukuran DSSC dengan menggunakan



cahaya matahari sebagai sumber cahaya. Intensitas cahaya matahari yang dipancarkan dianggap konstan sebesar 480 mW/cm^2 tanpa dilakukan pengukuran kuantitatif terhadap intensitas cahaya matahari tersebut. Selain itu, perhitungan dari nilai efisiensi yang didapatkan tidak melibatkan I_{sc} dan V_{oc} , sehingga hasil perhitungan yang didapatkan kurang akurat. Kekurangan tersebut coba diperbaiki pada penelitian ini, dengan menggunakan sumber cahaya yang konstan dan terukur intensitasnya sebesar 1000 W/m^2 . Oleh karena itu, penelitian ini tidak bias dibandingkan secara langsung dengan penelitian sebelumnya di Laboratorium Kimia Material, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC) berhasil difabrikasi menggunakan material semikonduktor TiO_2 yang dikompositkan dengan *graphene* dan *dye* dari ekstrak bunga geranium. DSSC dapat mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik dengan hasil paling maksimal pada variasi 10 wt% *graphene* dengan efisiensi 0,00532%, daya maksimal (P_{\max}) $52,3 \times 10^{-4} \text{ W}$; $I_{\text{SC}} = 0,00148 \text{ A}$; $V_{\text{OC}} = 595,198 \text{ mV}$; dan *fill factor* sebesar 0,69
2. Variasi komposisi 10%wt *graphene* merupakan komposisi yang paling optimal untuk menghasilkan performa DSSC yang maksimal. Apabila penambahan dilakukan melebihi jumlah komposisi tersebut, *graphene* akan menghalangi proses penghantaran *charge* dan absorpsi *dye* sehingga menurunkan efisiensi DSSC.

5.2 Saran

Agar didapatkan hasil yang lebih baik pada penelitian serupa di masa yang akan datang, saran yang dapat diberikan oleh penulis:

1. Menggunakan pengujian BET untuk mengetahui luas permukaan aktif elektroda kerja berbahan dasar komposit TiO_2 - *graphene*
2. Menggunakan pengujian *Transmission Electron Microscopy* (TEM) untuk mengetahui terbentuknya *single layer graphene*



~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR PUSTAKA

- Chien, C.Y., Hsu, B.D., 2013. Optimization of the dye sensitized solar cell with anthocyanin as photosensitizer. *Solar Energy*, 98, pp.203-211.
- Ekasari,V., dan Yudoyono, G., 2013. Fabrikasi DSSC dengan Dye Ekstrak Jahe Merah (Zingiber Officinale Linn Var. Rubrum) Variasi Larutan TiO₂ Nanopartikel Berfase Anatase dengan Teknik Pelapisan Spin Coating. *Jurnal Sains dan Seni POMITS*. 2 (1), pp. 2337-3520
- Fang, X., Li, M., Guo, K., Liu, X., Zhu, Y., Sebo, B., Zhao, X., 2014. Graphene-compositing optimization of the properties of dye-sensitized solar cells. *Solar Energy*, 101, pp.176-181.
- Foster, R., Ghassemi, M. & Cota, A., 2010. *Solar Energy Renewable Energy and The Environment*. Florida: CRC Press.
- Goetzberger, A. & Hoffman, V. U., 2005. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. New York: Springer.
- Gong, S., Liu, B., 2012. Electronic structures and optical properties of TiO₂: Improved density-functional-theory investigation. *Chin. Phys. B*, 21 (5), pp.1-7.
- Gratzel, M., 1998. Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye Sensitized Nanocrystalline Energy Converter. *Journal of Chemical Education*. 75 (6), pp.752-756.
- Handini, W., 2008. Performa Sel Surya Tersensitasi Zat Pewarna (DSSC) Berbasis ZnO dengan Variasi Tingkat Pengisian dan Besar Kristalit TiO₂. *Skripsi SI. Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia*.
- Ju, Hae-Mi, Sung-Ho Choi, Seung Hun., 2010. X-Ray Diffraction Pattern of Thermally Reduced Graphenes. *Journal of The Korean Physics Society*. 57, pp.1649 – 1652

- Khalid, N.R., et al., 2013. Enhanced photocatalytic activity of graphene TiO₂ composite under visible light irradiation. *Current Applied Physics*. 13, pp. 659 - 663
- Kreider, J. F. & Kreith, F., 1978. *Principles of Solar Engineering*. Washington DC: Mc Graw Book Company.
- Maddu, A., Zuhri, M., Irmansyah, 2007. Penggunaan Ekstrak Antosianin Kol Merah Sebagai Fotosensitizer pada Sel Surya TiO₂ Nanokristal Tersensitisasi Dye. *Makara Teknologi*. 11 (2), pp.78-84.
- Nadeak, S., Susanti, D., 2012. Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Kalsinasi Terhadap Unjuk Kerja Semikonduktor TiO₂ Sebagai Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Dye dari Ekstrak Buah Naga Merah. *Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya*.
- Nafi, M., Susanti, D., 2013. Aplikasi Semikonduktor ZnO dengan Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Kalsinasi Sebagai Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Dye dari Ekstrak Buah Terung Belanda (*Solanum betaceum*). *Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya*.
- Omar, A. & Huda A., 2013. Electron Transport Analysis in Zinc Oxide-Based Dye-Sensitized Solar Cells: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31, pp.149-157.
- Phani G., Tulloch, G., Vittorio, D. & Skyrabin, I., 2001. Titania Solar Cell: New Photovoltaic Technology. *Renewable Energy*. 22, pp.303-309.
- Pradesar, Y., Susanti, D., 2014. Pengaruh Waktu Ultrasonikasi dan Waktu Tahan Proses Hydrothermal Terhadap Struktur dan Sifat Listrik Material Graphene. *Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya*.
- Prasetya, A.N., Susanti, D., 2013. Pengaruh Temperatur Kalsinasi pada Kaca FTO yang di-coating ZnO terhadap Efisiensi DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) yang Menggunakan Dye dari Buah Terung Belanda (*Solanum betaceum*). *Tugas Akhir S1, Jurusan Teknik Material dan*

Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Rahman, A., 2009. Pengaruh Tingkat Kekristalan TiO_2 pada Tegangan Terbuka Sel Surya Tersensitisasi Pewarna Berbasis $\text{ZnO} - \text{TiO}_2$. *Fakultas Teknik Universitas Indonesia*.

Septina, W., 2007. Pembuatan Prototipe Solar Cell Murah dengan Bahan Organik-Inorganik (Dye Sensitized Solar Cell). *Laporan Akhir Penelitian Bidang Energi, Institut Teknologi Bandung*.

Subodro, R., Sunaryo, 2013. Ekstraksi pewarna bahan antosianin kulit Terong Ungu sebagai pewarna alami pada sel surya dye-sensitized Solar Cell (DSSC). *Politeknosains*, 9 (2), pp.74-83.

Shu, W., Liu, Y., Peng, Z., Chen, K., Zhang, C., Chen, W., 2013. Synthesis and photovoltaic performance of reduced graphene oxide- TiO_2 nanoparticles composites by solvothermal method. *Journals of Alloys and Compounds*, 563, pp.229-233.

Tsai, T., Chiou, S., Chen, S., 2011. Enhancement of Dye-Sensitized Solar Cells by using Graphene- TiO_2 Composites as Photoelectrochemical Working Electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, 6, pp. 3333 - 3343.

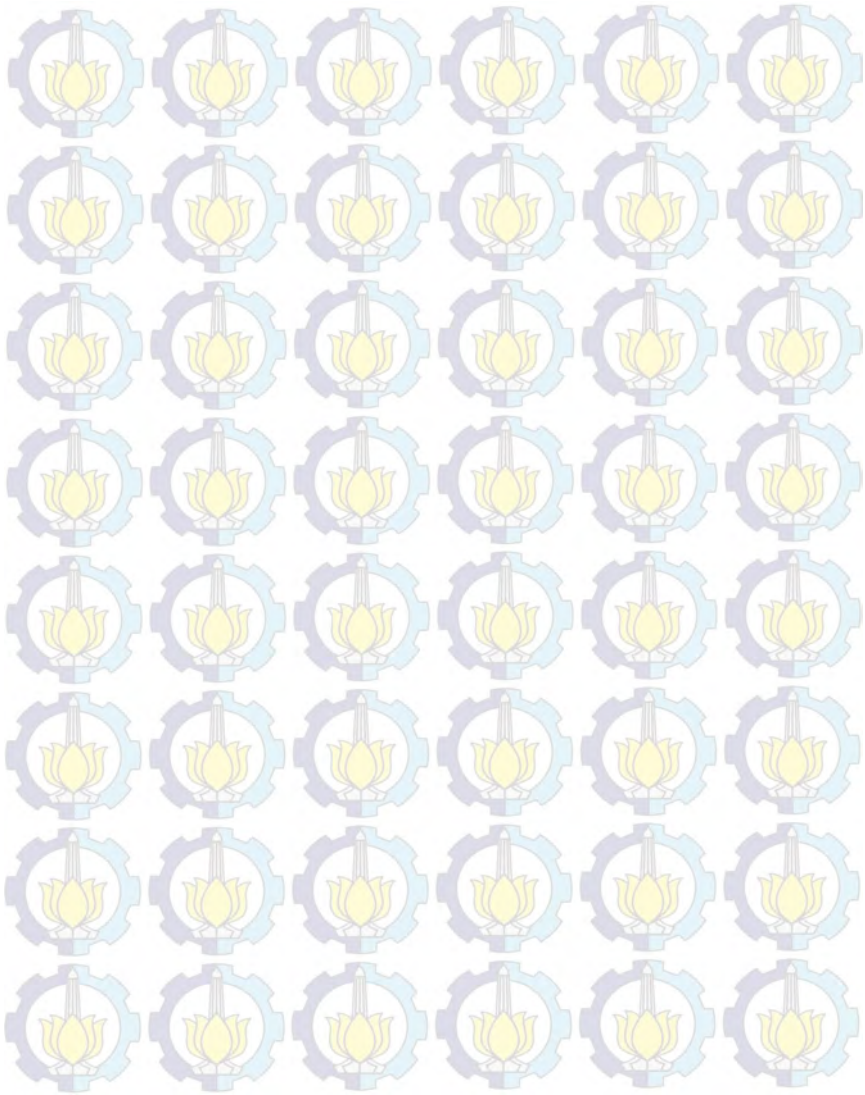
Tuominen, A., 2013. Defensive strategies in *Geranium sylvaticum*, Part 2: Roles of water-soluble tannins, flavonoids and phenolic acids against natural enemies. *Phytochemistry*, 95, pp.408-420.

Widyastuti, et al., 2008. Kompaktibilitas Komposit Isotropik $\text{Al} / \text{Al}_2\text{O}_3$ dengan Variabel Waktu Tahan Sinter. *Makara, Sains*. 12 (2), pp. 113-119

Wongcharee, K., Meeyoo, V., Chavadej, S., 2007. Dye-sensitized solar cell using natural dyes extracted from rosella and blue pea flowers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 91, pp.566-571.

Young & Freedman, 2008. *Sears and Zemansky's University Physics Vol. 2*. 13th ed. California: Pearson Education.

Yulianto, B., 2006. Energi Surya: Alternatif sumber energi masa depan Indonesia. *Berita Iptek*.



LAMPIRAN

Lampiran 1: Tabel Data Spektroskopi UV-Vis Dye Bawang Merah

Wavelength (nm)	Absorbance
335	3,89
340	4,09
345	4,111
350	3,791
355	4,13
360	4,002
365	4,263
370	4,151
375	4,918
380	3,811
385	4,39
390	4,013
395	3,648
400	3,423
405	2,395
410	1,58
415	1,036
420	0,709
425	0,516
430	0,411
435	0,36
440	0,334
445	0,323
450	0,32
455	0,323
460	0,33
465	0,343
470	0,361
475	0,383
480	0,41
485	0,438
490	0,471
495	0,502
500	0,531
505	0,558
510	0,581
515	0,595
520	0,602
525	0,599
530	0,585
535	0,56
540	0,522
545	0,478
550	0,424

555	0,368
560	0,312
565	0,258
570	0,213
575	0,172
580	0,138
585	0,113
590	0,09
595	0,074
600	0,062
605	0,052
610	0,045
615	0,037
620	0,033
625	0,029
630	0,025
635	0,022
640	0,02
645	0,019
650	0,017
655	0,014
660	0,013
665	0,012
670	0,011
675	0,009
680	0,008
685	0,007
690	0,006
695	0,004
700	0,004
705	0,004
710	0,003
715	0,002
720	0

Lampiran 2: Tabel Data Spektroskopi UV-Vis Dye Bawang Merah

Wavelength (nm)	Absorbance
395	3,966
400	3,456
405	3,037
410	2,732
415	2,54
420	2,394
425	2,291
430	2,201
435	2,129
440	2,063

445	2,007
450	1,964
455	1,938
460	1,942
465	1,981
470	2,056
475	2,176
480	2,341
485	2,527
490	2,76
495	2,986
500	3,215
505	3,418
510	3,619
515	3,897
520	4,479
525	4,117
530	4,059
535	4,101
540	3,853
545	3,45
550	3,143
555	2,712
560	2,291
565	1,855
570	1,489
575	1,165
580	0,914
585	0,719
590	0,56
595	0,438
600	0,337
605	0,253
610	0,188
615	0,133
620	0,091
625	0,058
630	0,031
635	0,011

Lampiran 3: Tabel Data Spektroskopi UV-Vis Dye Bunga Geranium

Wavelength (nm)	Absorbance
200	0,685
205	0,752
210	0,693
215	0,694

220	0,787
225	0,723
230	1,19
235	1,275
240	1,432
245	1,26
250	1,066
255	1,18
260	1,326
265	1,408
270	1,453
275	1,957
280	1,948
285	2,009
290	2,334
295	3,022
300	3,864769697
305	4,056342424
310	4,220837229
315	4,358254113
320	4,468593074
325	4,594138528
330	4,665030303
334	4,692588745
340	4,667017316
344	4,590731602
350	4,610450216
354	4,512878788
359	4,576701299
364	4,482900433
370	4,554809524
371	4,565497835
376	4,58595671
380	4,545497835
385	4,464424242
390	4,418766234
395	4,307705628
400	3,971731602
405	3,608601732
410	3,048532468
415	2,476632035
420	1,918458874
425	1,554943723
430	1,442961039
435	1,393242424
440	1,371450216
445	1,365385281
450	1,370341991
455	1,385333333
460	1,412238095
465	1,453961039
470	1,51482684

475	1,599883117
480	1,710818182
485	1,848333333
490	2,011034632
495	2,196212121
500	2,404735931
505	2,625454545
510	2,857051948
515	3,067242424
520	3,274835498
525	3,43138961
530	3,551909091
535	3,624445887
540	3,638125541
545	3,494471861
550	3,435878788
555	3,412584416
560	3,502277056
565	3,396307359
570	3,146225108
575	2,752614719
580	2,229757576
585	1,593839827
590	1,139445887
595	0,832155844
600	0,712493506
605	0,541168831
610	0,40521645
615	0,301220779
620	0,227969697
625	0,177813853
630	0,142987013
635	0,118987013
640	0,101761905
645	0,088809524
650	0,07669697
655	0,067575758
660	0,060541126
665	0,05487013
670	0,049125541
675	0,043900433
680	0,039380952
685	0,035943723
690	0,033761905
695	0,032311688
700	0,031471861
705	0,030766234
710	0,029831169
715	0,028939394
720	0,028
725	0,026878788
730	0,026108225

735	0,025419913
740	0,024878788
745	0,024506494
750	0,024281385
755	0,024229437
760	0,023909091
765	0,023922078
770	0,023645022
775	0,023406926
780	0,02338961
785	0,023331169
790	0,023322511
795	0,023363636
800	0,023454545

Lampiran 4: Tabel Data Spektroskopi UV-Vis Dye Pucuk Merah

Wavelength (nm)	Absorbance
475	4,45
480	4,178
485	4,218
490	4,093
495	3,986
500	3,907
505	3,756
510	3,57
515	3,388
520	3,188
525	2,992
530	2,826
535	2,661
540	2,473
545	2,309
550	2,126
555	1,941
560	1,756
565	1,571
570	1,396
575	1,215
580	1,051
585	0,902
590	0,763
595	0,651
600	0,552
605	0,471
610	0,407
615	0,355
620	0,315

625	0,283
630	0,256
635	0,234
640	0,217
645	0,201
650	0,189
655	0,177
660	0,166
665	0,155
670	0,147
675	0,137
680	0,125
685	0,115
690	0,106
695	0,096
700	0,09
705	0,083
710	0,076
715	0,069
720	0,063
725	0,056
730	0,05
735	0,044
740	0,039
745	0,035
750	0,029
755	0,025
760	0,021
765	0,016
770	0,014
775	0,009
780	0,005
785	0,002

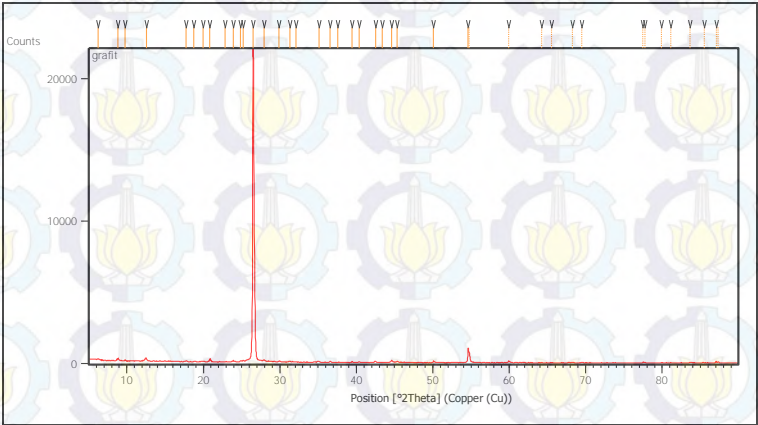
Lampiran 5: Tabel Data Spektroskopi UV-Vis Dye Sirih Merah

Wavelength (nm)	Absorbance
410	3,821
415	3,156
420	2,799
425	2,535
430	2,346
435	2,204
440	2,079
445	1,953
450	1,831
455	1,708

460	1,6
465	1,501
470	1,424
475	1,362
480	1,312
485	1,267
490	1,223
495	1,181
500	1,14
505	1,101
510	1,063
515	1,03
520	0,995
525	0,962
530	0,928
535	0,892
540	0,854
545	0,817
550	0,775
555	0,732
560	0,69
565	0,646
570	0,605
575	0,563
580	0,528
585	0,495
590	0,468
595	0,446
600	0,424
605	0,401
610	0,375
615	0,348
620	0,322
625	0,301
630	0,284
635	0,278
640	0,284
645	0,307
650	0,341
655	0,37
660	0,364
665	0,324
670	0,27
675	0,213
680	0,169
685	0,137
690	0,114
695	0,097
700	0,085
705	0,074
710	0,066
715	0,058

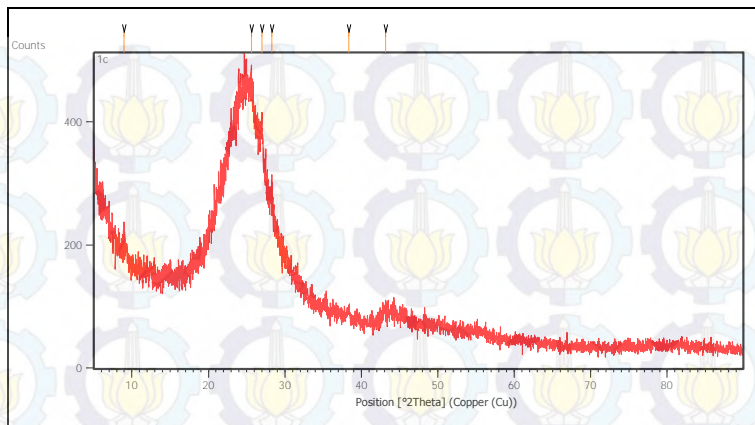
720	0,052
725	0,047
730	0,041
735	0,035
740	0,03
745	0,027
750	0,024
755	0,019
760	0,017
765	0,012
770	0,01
775	0,006
780	0,004
785	0,002

Lampiran 6: Grafik dan Daftar Puncak XRD Grafit



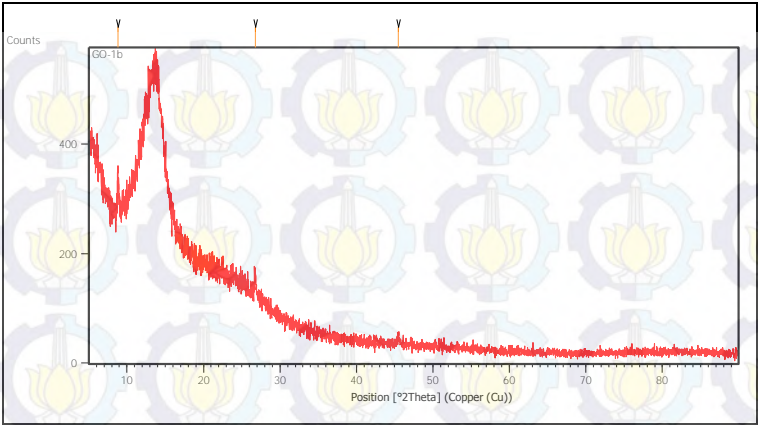
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
6.2150	153.27	0.2676	14.22152	0.72
8.8364	213.85	0.1338	10.00758	1.01
9.7548	140.45	0.0669	9.06731	0.66
12.5594	180.22	0.0836	7.04812	0.85
17.7324	82.03	0.1004	5.00195	0.39
18.7488	27.40	0.2342	4.73301	0.13
19.9493	53.31	0.2676	4.45081	0.25
20.8572	190.86	0.1171	4.25908	0.90
22.8294	27.47	0.2342	3.89542	0.13
23.8900	98.41	0.1004	3.72482	0.46
24.8329	89.54	0.1338	3.58549	0.42
25.2155	145.04	0.1171	3.53195	0.68
26.4866	21219.10	0.1004	3.36527	100.00
27.9064	149.97	0.2676	3.19720	0.71
29.9119	86.43	0.2007	2.98724	0.41
31.3114	69.88	0.1004	2.85684	0.33
32.1280	35.81	0.2007	2.78607	0.17
35.0902	73.43	0.2676	2.55738	0.35
36.5516	71.25	0.2007	2.45841	0.34
37.6005	24.71	0.3346	2.39221	0.12
39.4296	49.71	0.1004	2.28535	0.23
40.3703	43.27	0.2007	2.23424	0.20
42.5367	114.44	0.0612	2.12358	0.54
43.3742	28.78	0.2007	2.08622	0.14
44.6160	159.31	0.2007	2.03100	0.75
45.3336	75.79	0.1673	2.00050	0.36
50.1067	112.35	0.0836	1.82056	0.53
54.6146	1018.95	0.1020	1.67908	4.80
54.7777	709.92	0.1020	1.67862	3.35
59.9422	132.48	0.0612	1.54195	0.62
64.2095	12.39	0.4896	1.44938	0.06
65.4882	9.59	0.9792	1.42414	0.05
68.2426	29.17	0.3264	1.37321	0.14
69.4565	10.66	0.4896	1.35215	0.05
77.4844	61.70	0.1020	1.23087	0.29
77.7428	31.37	0.1632	1.22742	0.15
79.9016	20.64	0.3264	1.19960	0.10
81.1485	19.65	0.2448	1.18429	0.09
83.6130	50.82	0.1632	1.15553	0.24
85.4965	13.73	0.6528	1.13483	0.06
87.0593	120.56	0.1020	1.11843	0.57
87.3235	69.33	0.1224	1.11850	0.33

Lampiran 7: Grafik dan Daftar Puncak XRD Graphene



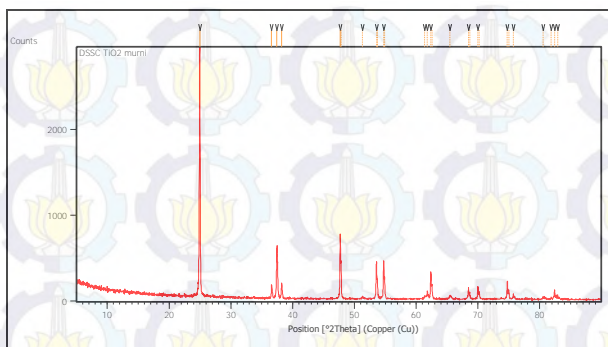
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
8.9987	21.23	0.4015	9.82742	26.58
25.6505	75.28	0.4015	3.47302	94.24
26.9985	79.89	0.2007	3.30261	100.00
28.3036	30.53	0.4015	3.15322	38.21
38.3259	14.19	0.5353	2.34859	17.76
43.1735	11.41	0.8029	2.09545	14.29

Lampiran 8: Grafik dan Daftar Puncak XRD Grafit Oksida



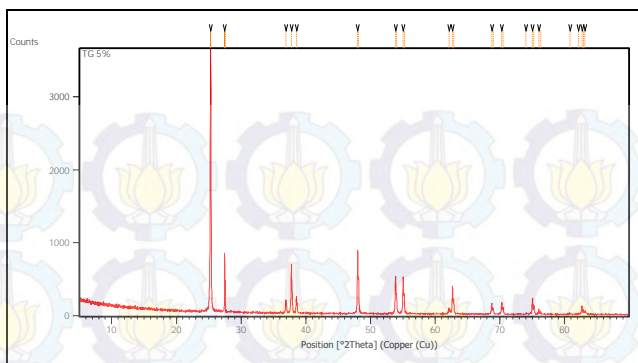
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
8.8076	73.97	0.1338	10.04021	100.00
26.7618	44.27	0.1673	3.33128	59.84
45.4614	15.54	0.2676	1.99518	21.00

Lampiran 9: Grafik dan Daftar Puncak XRD TiO₂ – 0%Graphene



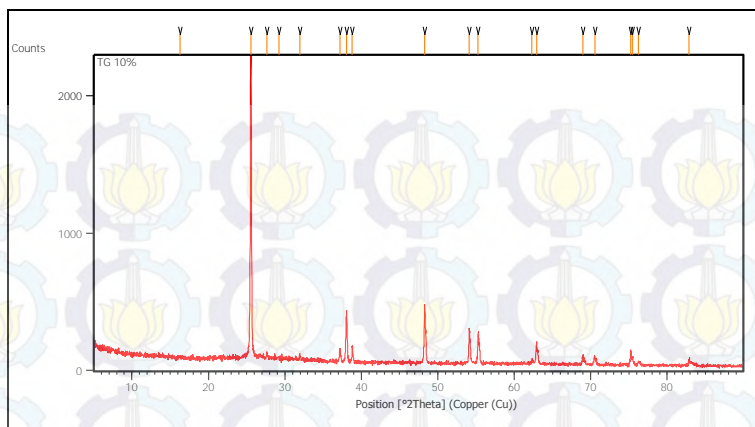
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
24.9625	2911.23	0.1338	3.56717	100.00
36.5806	145.53	0.0669	2.45653	5.00
37.4471	540.10	0.1004	2.40166	18.55
38.2330	183.21	0.1171	2.35408	6.29
47.7079	745.25	0.1020	1.90476	25.60
47.8462	411.62	0.0816	1.90430	14.14
51.3259	25.34	0.2448	1.77867	0.87
53.5615	405.74	0.1224	1.70958	13.94
53.7402	208.07	0.0816	1.70855	7.15
54.7344	431.06	0.1020	1.67569	14.81
54.8992	234.15	0.0816	1.67520	8.04
61.3844	33.27	0.3264	1.50913	1.14
61.8050	92.78	0.0816	1.49987	3.19
62.3803	309.85	0.1224	1.48741	10.64
62.5685	164.31	0.0816	1.48707	5.64
65.4829	44.19	0.1224	1.42424	1.52
68.4739	133.89	0.1020	1.36914	4.60
68.6759	64.35	0.1224	1.36899	2.21
69.9826	126.94	0.1428	1.34327	4.36
70.2068	81.52	0.1020	1.34285	2.80
74.7533	207.85	0.1020	1.26892	7.14
75.0091	114.35	0.1020	1.26837	3.93
75.7535	48.71	0.1224	1.25463	1.67
80.5473	23.14	0.2448	1.19160	0.79
81.8688	21.22	0.1224	1.17568	0.73
82.4133	109.84	0.1020	1.16929	3.77
82.8872	48.20	0.1224	1.16380	1.66

Lampiran 10: Grafik dan Daftar Puncak XRD TiO₂ – 5% Graphene



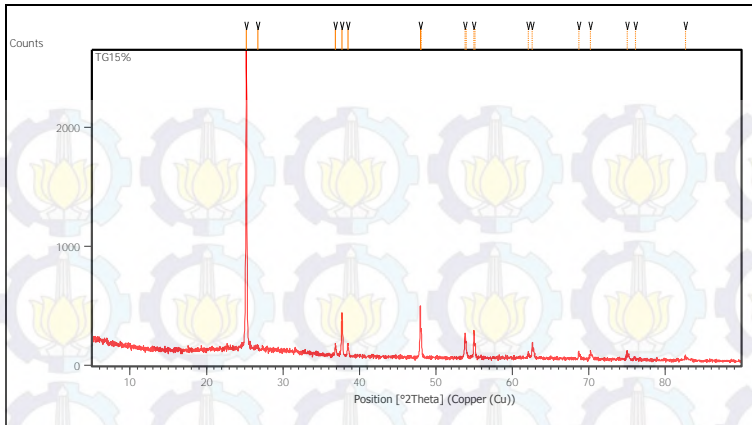
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.2871	3610.63	0.1338	3.52211	100.00
27.4643	799.88	0.0408	3.24496	22.15
27.5497	367.82	0.0408	3.24313	10.19
36.9203	183.95	0.0816	2.43269	5.09
37.7782	669.97	0.1224	2.37940	18.56
38.5514	231.90	0.0816	2.33343	6.42
48.0163	865.05	0.1020	1.89325	23.96
48.1568	492.19	0.0612	1.89274	13.63
53.8678	508.49	0.1020	1.70058	14.08
54.0330	240.91	0.0816	1.69999	6.67
55.0540	504.17	0.1020	1.66671	13.96
55.2109	269.39	0.0816	1.66648	7.46
62.1273	75.73	0.1428	1.49286	2.10
62.6652	376.14	0.1020	1.48133	10.42
62.8440	198.39	0.0612	1.48122	5.49
68.7284	151.10	0.1020	1.36469	4.18
68.9390	80.94	0.1020	1.36441	2.24
70.2853	158.02	0.1224	1.33822	4.38
70.4977	87.09	0.1224	1.33803	2.41
74.0319	11.28	0.3264	1.27949	0.31
75.0400	220.09	0.1224	1.26478	6.10
75.2529	107.85	0.1020	1.26486	2.99
76.0053	63.62	0.1020	1.25110	1.76
76.2788	33.94	0.1224	1.25039	0.94
80.7984	8.25	0.6528	1.18853	0.23
82.1577	22.33	0.1224	1.17228	0.62
82.6771	115.58	0.1020	1.16622	3.20
82.9111	57.17	0.1224	1.16642	1.58
83.1632	51.41	0.1224	1.16064	1.42

Lampiran 11: Grafik dan Daftar Puncak XRD TiO₂ – 10% Graphene



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
16.2723	7.87	0.6691	5.44732	0.38
25.5351	2084.67	0.1506	3.48846	100.00
27.6366	39.29	0.1004	3.22779	1.88
29.2003	7.68	0.1506	3.05840	0.37
31.9708	27.20	0.1673	2.79941	1.30
37.1891	93.66	0.1004	2.41772	4.49
38.0706	372.81	0.1171	2.36374	17.88
38.8021	118.89	0.0669	2.32085	5.70
48.2699	398.24	0.1171	1.88545	19.10
54.1195	256.08	0.0669	1.69467	12.28
55.2656	182.19	0.1338	1.66221	8.74
62.3160	33.96	0.1004	1.49002	1.63
62.9292	158.02	0.1338	1.47697	7.58
68.9723	57.60	0.1338	1.36158	2.76
70.5232	65.59	0.1004	1.33539	3.15
75.2458	100.03	0.0612	1.26183	4.80
75.4757	61.35	0.1224	1.25856	2.94
76.2108	21.59	0.3346	1.24927	1.04
82.8768	48.64	0.1338	1.16488	2.33

Lampiran 12: Grafik dan Daftar Puncak XRD TiO₂ – 15% Graphene



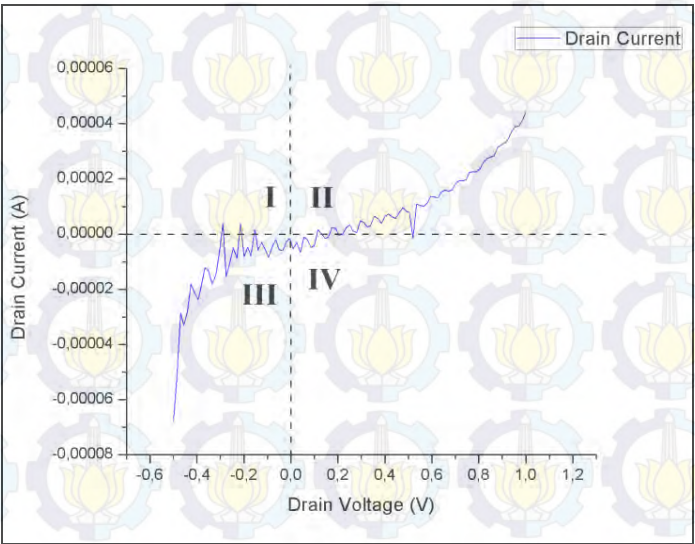
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
25.2167	2525.93	0.1338	3.53178	100.00
26.7039	28.21	0.2007	3.33838	1.12
36.8394	97.89	0.0836	2.43987	3.88
37.7140	359.50	0.1171	2.38527	14.23
38.4788	106.27	0.0836	2.33960	4.21
47.9535	436.52	0.0816	1.89558	17.28
48.0884	226.17	0.0612	1.89527	8.95
53.8029	196.97	0.1224	1.70248	7.80
53.9459	135.50	0.0612	1.70252	5.36
54.9804	232.96	0.1020	1.66877	9.22
55.1380	116.92	0.0816	1.66851	4.63
62.0948	22.35	0.3264	1.49356	0.88
62.5904	124.28	0.1428	1.48292	4.92
68.6682	61.06	0.1224	1.36574	2.42
70.2072	75.74	0.0816	1.33952	3.00
74.9788	67.42	0.1632	1.26566	2.67
76.0852	11.02	0.4896	1.24998	0.44
82.6028	36.62	0.1632	1.16708	1.45

Lampiran 13: Tabel Karakteristik I-V Gelap untuk 0% Graphene

Drain Voltage (V)	Drain Current (A)
-1,000094175	-0,000150024
-0,97009778	-6,37E-05
-0,940101385	-4,07E-05
-0,910190821	-2,80E-05
-0,880130053	-2,06E-05
-0,848610878	-1,46E-05
-0,819043636	-1,08E-05
-0,789626598	-1,86E-06
-0,757763386	2,09E-05
-0,729569435	-4,34E-06
-0,69837141	-3,41E-06
-0,668181896	-1,64E-06
-0,638614655	-2,95E-06
-0,608596802	1,37E-07
-0,578707695	3,57E-07
-0,549033165	2,13E-07
-0,518993855	2,52E-06
-0,489426613	3,70E-06
-0,459215641	5,23E-06
-0,429433823	4,35E-06
-0,399544716	5,66E-06
-0,369505405	4,96E-06
-0,339466095	5,86E-06
-0,309684277	6,22E-06
-0,279709339	6,86E-06
-0,250099182	8,20E-06
-0,219609261	6,86E-06
-0,189805984	8,23E-06
-0,160002708	8,95E-06
-0,129984856	9,01E-06
-0,100095749	9,27E-06
-0,069927692	9,61E-06
-0,039824009	9,64E-06
-0,009999275	-2,05E-05
0,019738913	1,08E-05
0,049820423	1,07E-05
0,079859018	1,12E-05
0,110262394	1,18E-05
0,140086412	1,22E-05
0,169996262	1,24E-05
0,200335264	1,24E-05
0,230266571	1,28E-05
0,260219336	1,30E-05
0,2901721	1,37E-05
0,320124865	1,44E-05
0,350142002	1,46E-05
0,379901648	1,49E-05
0,410154819	1,61E-05
0,440322161	1,62E-05
0,470124722	1,64E-05
0,500077486	1,80E-05

0,53022337	1,83E-05
0,559918642	1,89E-05
0,590214729	1,98E-05
0,620167494	2,02E-05
0,649905682	2,07E-05
0,680094481	2,15E-05
0,710111618	2,21E-05
0,740064383	2,38E-05
0,77008152	2,55E-05
0,800034285	2,65E-05
0,830094337	2,73E-05
0,860283136	2,75E-05
0,890021324	2,95E-05
0,920081377	2,93E-05
0,95014143	3,18E-05
0,980180025	3,33E-05
1,01013279	3,49E-05
1,0402143	3,63E-05
1,07020998	3,76E-05
1,10020566	4,03E-05
1,130266428	4,25E-05
1,160133362	4,47E-05
1,190107584	4,71E-05
1,220253468	5,14E-05
1,250463724	5,54E-05
1,280244827	6,02E-05
1,310369253	6,57E-05
1,340472221	7,14E-05
1,370339155	7,72E-05
1,400635242	8,58E-05
1,430588007	9,49E-05
1,460390568	0,000102635
1,490450621	0,000116374
1,520381927	0,000129301
1,550506353	0,000144701
1,58035183	0,000162311
1,610476255	0,000183439
1,640450478	0,000206262
1,670596361	0,000234114
1,700570583	0,000265674
1,73050189	0,000300904
1,76049757	0,00034197
1,790450335	0,000387671
1,820424557	0,000439641
1,850377321	0,000499232
1,880523205	0,000565037
1,910518885	0,000638093
1,940321445	0,0007184
1,970488787	0,000807331
2,000527382	0,000903612

Lampiran 14: Kurva Karakteristik I-V Gelap untuk 0% Graphene



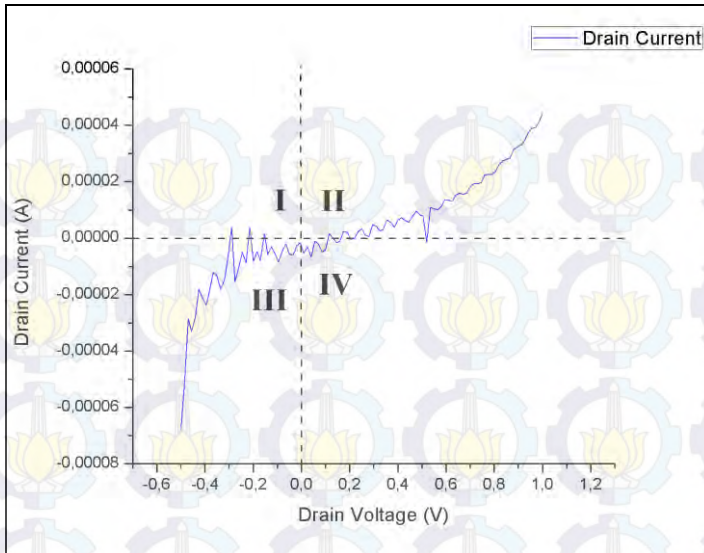
Lampiran 15: Tabel Karakteristik I-V Terang untuk 0% Graphene

Drain Voltage	Drain Current
-0,500167251	-6,77E-05
-0,48511076	-5,15E-05
-0,470196247	-2,85E-05
-0,455202937	-3,29E-05
-0,440130711	-2,82E-05
-0,425153136	-1,80E-05
-0,410143971	-2,13E-05
-0,395126939	-2,37E-05
-0,380102038	-1,87E-05
-0,365124464	-1,22E-05
-0,350111365	-1,32E-05
-0,335066676	-1,80E-05
-0,320093036	-1,49E-05
-0,305083871	-6,80E-06
-0,28992486	3,79E-06
-0,275109053	-1,55E-05
-0,260076165	-1,06E-05
-0,245114446	-4,92E-06
-0,230101347	-8,76E-06

-0,214666128	3,79E-06
-0,200134277	-8,08E-06
-0,184667587	-4,73E-06
-0,169784665	-7,71E-06
-0,154069424	1,56E-06
-0,140046477	-5,87E-06
-0,124741435	-3,00E-06
-0,109795451	-5,66E-06
-0,094529867	-8,35E-06
-0,079591751	-4,76E-06
-0,064685225	-2,04E-06
-0,049431443	-5,61E-06
-0,034560442	-6,00E-06
-0,019807696	-2,70E-06
-0,004814267	-1,48E-06
0,010557413	-5,27E-06
0,025199413	-3,02E-06
0,04022789	-6,64E-06
0,055327415	-9,69E-07
0,070206046	-1,83E-06
0,085439682	-4,93E-06
0,100255251	-3,95E-06
0,115323186	1,53E-06
0,130217552	1,94E-07
0,1453408	-1,51E-06
0,160321951	-1,04E-06
0,175184846	2,38E-06
0,190205455	2,09E-06
0,20530498	-3,14E-07
0,220313787	1,72E-07
0,235279202	2,36E-06
0,250260472	3,37E-06
0,265494108	9,97E-07
0,28035295	5,95E-07
0,295267105	4,90E-06
0,310248256	4,13E-06
0,325276852	2,53E-06
0,340336919	3,15E-06
0,355235219	6,41E-06
0,370275617	5,66E-06
0,385343552	3,93E-06
0,400206447	6,43E-06
0,415230989	7,33E-06
0,430294991	6,34E-06
0,445331454	5,70E-06
0,460304737	7,56E-06
0,47530961	9,53E-06
0,490302682	8,31E-06
0,505327225	7,78E-06
0,520095468	-1,38E-06
0,535048962	1,08E-05
0,550038099	1,04E-05

0,565058708	1,01E-05
0,580067515	1,13E-05
0,595092058	1,36E-05
0,610073328	1,35E-05
0,625074148	1,30E-05
0,640079021	1,53E-05
0,655127287	1,60E-05
0,67013216	1,55E-05
0,685113311	1,60E-05
0,700130105	1,82E-05
0,715134859	1,94E-05
0,730131865	1,93E-05
0,745121002	1,97E-05
0,760094285	2,24E-05
0,775126696	2,28E-05
0,790135503	2,25E-05
0,805132508	2,38E-05
0,820137382	2,61E-05
0,8351264	2,75E-05
0,850119472	2,79E-05
0,865147948	2,85E-05
0,880184412	3,13E-05
0,89517355	3,23E-05
0,910134912	3,32E-05
0,925151706	3,44E-05
0,940128922	3,74E-05
0,955133796	3,88E-05
0,970158339	3,93E-05
0,985143423	4,12E-05
1,000140429	4,42E-05

Lampiran 16: Kurva Karakteristik I-V Terang untuk 0% Graphene



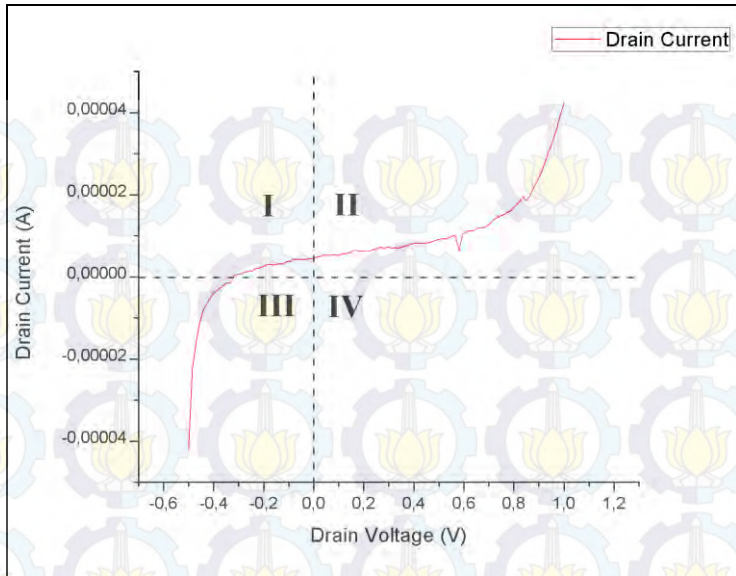
Lampiran 16: Tabel Karakteristik I-V Gelap untuk 5% Graphene

Drain Voltage (V)	Drain Current (A)
-0,50021	-6,51E-05
-0,48516	-3,85E-05
-0,47019	-2,86E-05
-0,45519	-2,26E-05
-0,44018	-1,85E-05
-0,42516	-1,53E-05
-0,41015	-1,24E-05
-0,39513	-1,05E-05
-0,38014	-7,62E-06
-0,36448	-7,09E-06
-0,34965	-5,78E-06
-0,33473	-4,77E-06
-0,31973	-3,82E-06
-0,30471	-2,94E-06
-0,28976	-2,18E-06
-0,2747	-1,98E-06
-0,25969	1,48E-07
-0,24471	8,34E-07
-0,22973	8,77E-07
-0,2148	1,72E-06

-0,19977	2,28E-06
-0,18479	2,50E-06
-0,16979	2,93E-06
-0,15473	3,98E-06
-0,13975	4,10E-06
-0,12479	4,59E-06
-0,10976	4,64E-06
-0,09478	5,12E-06
-0,07976	5,26E-06
-0,06473	3,36E-06
-0,04978	4,41E-06
-0,0348	5,07E-06
-0,01984	5,34E-06
-0,00477	5,76E-06
0,010207	6,25E-06
0,025169	6,15E-06
0,040225	6,67E-06
0,055274	6,86E-06
0,070011	7,84E-06
0,085064	8,13E-06
0,100065	8,07E-06
0,115185	8,08E-06
0,130175	8,34E-06
0,144999	8,73E-06
0,159957	9,04E-06
0,174982	9,24E-06
0,190011	9,82E-06
0,204965	5,40E-06
0,219998	1,08E-05
0,235035	1,10E-05
0,25004	1,12E-05
0,26503	1,17E-05
0,280043	1,18E-05
0,295037	1,29E-05
0,310066	1,36E-05
0,325032	1,26E-05
0,340049	1,29E-05
0,355019	1,39E-05
0,370048	1,48E-05
0,385014	1,55E-05
0,400039	1,75E-05
0,415048	1,70E-05
0,430061	1,79E-05
0,445106	1,89E-05
0,460088	1,97E-05
0,475109	2,05E-05
0,490134	2,10E-05
0,505104	2,22E-05
0,520094	2,38E-05
0,535091	2,49E-05
0,550089	2,61E-05
0,565086	2,69E-05

0,580064	2,82E-05
0,595105	2,92E-05
0,610106	3,11E-05
0,625123	3,25E-05
0,640117	3,43E-05
0,655158	3,55E-05
0,670163	3,68E-05
0,685102	3,92E-05
0,700174	4,03E-05
0,715175	4,27E-05
0,730121	4,47E-05
0,74517	4,63E-05
0,760144	4,95E-05
0,775161	5,14E-05
0,790147	5,33E-05
0,805196	5,68E-05
0,820154	5,86E-05
0,835175	6,15E-05
0,850137	6,44E-05
0,865225	6,85E-05
0,880203	7,15E-05
0,8952	7,40E-05
0,91017	7,73E-05
0,92516	8,14E-05
0,940201	8,48E-05
0,955186	8,90E-05
0,970204	9,42E-05
0,985177	9,78E-05
1,00021	0,000101

Lampiran 16: Kurva Karakteristik I-V Gelap untuk 5% Graphene



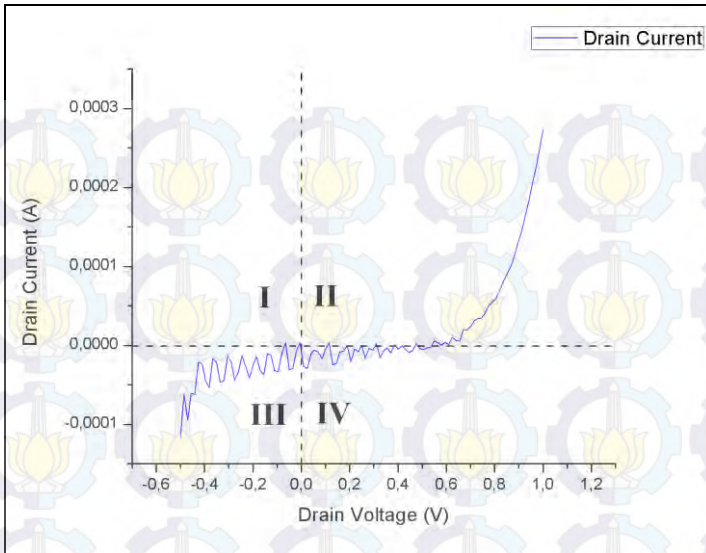
Lampiran 17: Tabel Karakteristik I-V Terang untuk 5% Graphene

Drain Voltage	Drain Current
-0,500173688	-0,000115989
-0,485116839	-6,20E-05
-0,470146894	-9,48E-05
-0,455172896	-6,09E-05
-0,440120101	-6,23E-05
-0,425118446	-2,13E-05
-0,410152435	-2,38E-05
-0,395095587	-4,59E-05
-0,380062461	-5,35E-05
-0,365092516	-1,67E-05
-0,35007906	-2,12E-05
-0,335061789	-4,71E-05
-0,32008779	-4,49E-05
-0,305074453	-1,38E-05
-0,290100455	-2,11E-05
-0,275083184	-4,43E-05
-0,260073662	-3,44E-05
-0,245115519	-1,30E-05
-0,230086327	-2,64E-05

-0,215065002	-4,20E-05
-0,200043797	-2,45E-05
-0,185065866	-1,35E-05
-0,170020938	-3,14E-05
-0,15499568	-3,76E-05
-0,140013814	-1,00E-05
-0,125031948	-1,28E-05
-0,109990954	-3,19E-05
-0,095009089	-3,32E-05
-0,08003521	-9,98E-06
-0,065073133	3,47E-06
-0,050024152	-3,03E-05
-0,035018682	-2,85E-05
-0,020036817	-7,90E-06
-0,005051017	3,44E-06
0,009942293	-2,66E-05
0,025006652	-2,92E-05
0,040019631	-1,00E-05
0,055013061	-6,11E-06
0,069864392	-8,45E-06
0,085354686	-1,67E-05
0,099989057	-5,09E-06
0,114954829	3,11E-06
0,129971743	-2,45E-05
0,145304322	-2,24E-05
0,160230637	-8,49E-06
0,175062299	-7,45E-06
0,189838648	-2,22E-07
0,205431581	-2,05E-05
0,220294714	-4,11E-06
0,235146046	-8,70E-06
0,250088096	4,70E-07
0,265239239	-1,66E-05
0,280149698	-3,80E-06
0,295194268	-6,08E-06
0,310672879	2,05E-06
0,325472832	-1,55E-05
0,34006393	-7,42E-06
0,355641007	-3,23E-06
0,370642185	-9,44E-06
0,385899901	7,57E-07
0,40010035	-4,90E-06
0,415369749	-3,50E-07
0,430690527	-4,90E-06
0,445735097	-9,27E-06
0,460432649	-6,79E-06
0,475473285	1,39E-06
0,490659952	-4,32E-06
0,50560987	-5,53E-06
0,520046949	-3,11E-06
0,535462379	-2,71E-06
0,550376892	5,91E-06

0,56551218	3,39E-06
0,580414772	4,16E-07
0,595096469	4,10E-06
0,6101017	1,08E-06
0,625181794	1,02E-05
0,640131712	6,48E-06
0,655176401	5,31E-06
0,670197368	2,02E-05
0,685147285	1,89E-05
0,700168252	2,39E-05
0,715165496	3,14E-05
0,730158806	3,37E-05
0,745148182	3,52E-05
0,760153413	4,00E-05
0,775134921	5,00E-05
0,790171623	5,47E-05
0,80519259	5,95E-05
0,820189834	6,86E-05
0,835187078	8,13E-05
0,850192308	8,89E-05
0,865225077	9,94E-05
0,88019073	0,000111237
0,895223618	0,000129357
0,910205007	0,000143843
0,925194502	0,000160412
0,94017601	0,000180637
0,955200791	0,000203104
0,970209956	0,00022406
0,985191464	0,000248011
1,000204563	0,000273563

Lampiran 18: Kurva Karakteristik I-V Terang untuk 5% Graphene



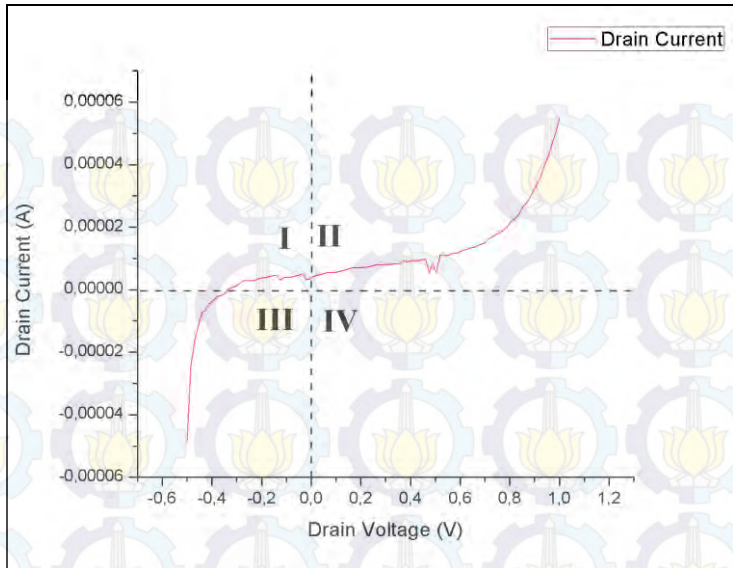
Lampiran 19: Tabel Karakteristik I-V Gelap untuk 10% Graphene

Drain Voltage	Drain Current
-0,500174165	-4,86E-05
-0,485117435	-2,45E-05
-0,470147491	-1,63E-05
-0,45516181	-1,20E-05
-0,440184116	-7,56E-06
-0,424551487	-6,60E-06
-0,409755111	-4,53E-06
-0,394832611	-3,25E-06
-0,379838943	-2,25E-06
-0,364660025	-1,86E-06
-0,349768996	-1,45E-06
-0,33471632	1,54E-07
-0,319750309	7,84E-07
-0,304697633	9,97E-07
-0,289755344	1,99E-06
-0,274698615	2,86E-06
-0,259775996	2,79E-06
-0,24475491	2,95E-06
-0,229840159	2,88E-06
-0,214755893	3,35E-06

-0,199738622	3,70E-06
-0,184764743	3,79E-06
-0,169755459	4,20E-06
-0,154801369	4,47E-06
-0,139720917	4,53E-06
-0,124683976	3,10E-06
-0,109686494	3,82E-06
-0,094748139	3,94E-06
-0,079730868	4,09E-06
-0,064733386	4,40E-06
-0,049735904	4,60E-06
-0,034754157	5,13E-06
-0,019665956	3,31E-06
-0,00473547	3,38E-06
0,010218263	4,18E-06
0,025290489	4,57E-06
0,040287614	4,87E-06
0,055245399	5,25E-06
0,070262194	5,59E-06
0,085243702	5,45E-06
0,100232959	5,55E-06
0,115202546	5,88E-06
0,130172014	6,15E-06
0,145184994	6,41E-06
0,160237432	6,92E-06
0,175258279	6,94E-06
0,190176606	6,96E-06
0,205311775	7,10E-06
0,220304966	7,09E-06
0,235207558	7,36E-06
0,250283599	7,62E-06
0,265245318	8,03E-06
0,280317426	7,86E-06
0,295302749	7,93E-06
0,310228944	8,03E-06
0,325166941	8,10E-06
0,340167999	8,29E-06
0,35529542	8,16E-06
0,370079517	9,36E-06
0,385230541	8,98E-06
0,40010941	9,25E-06
0,415220976	9,14E-06
0,430158973	9,26E-06
0,445136428	9,51E-06
0,460125685	9,86E-06
0,475142598	5,52E-06
0,490127921	8,15E-06
0,505117297	5,75E-06
0,520110488	1,12E-05
0,535103679	1,08E-05
0,550096989	1,08E-05
0,565078378	1,14E-05

0,580107093	1,14E-05
0,595092416	1,20E-05
0,610093594	1,26E-05
0,625122309	1,29E-05
0,640119433	1,33E-05
0,655136347	1,37E-05
0,670161128	1,41E-05
0,685185909	1,46E-05
0,700171232	1,50E-05
0,715176344	1,63E-05
0,730157733	1,69E-05
0,745162845	1,77E-05
0,760171771	1,81E-05
0,775169015	1,91E-05
0,79016614	2,00E-05
0,805186987	2,19E-05
0,820192099	2,26E-05
0,835149765	2,42E-05
0,850198269	2,61E-05
0,865199327	2,76E-05
0,880200505	2,93E-05
0,895189762	3,16E-05
0,910226345	3,39E-05
0,925199866	3,62E-05
0,940193176	3,96E-05
0,955174565	4,29E-05
0,970183492	4,66E-05
0,985208392	5,02E-05
1,000205517	5,49E-05

Lampiran 20: Kurva Karakteristik I-V Gelap untuk 10% Graphene



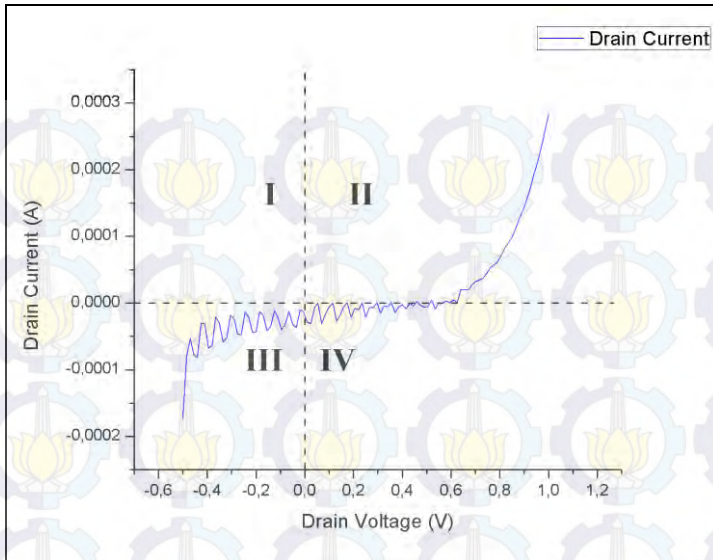
Lampiran 21: Tabel Karakteristik I-V Terang untuk 10% Graphene

Drain Voltage	Drain Current
-0,500134945	-0,000173541
-0,485113382	-8,03E-05
-0,470166802	-5,35E-05
-0,455121517	-7,63E-05
-0,440096021	-8,19E-05
-0,425098181	-2,96E-05
-0,410104275	-3,15E-05
-0,395074844	-6,83E-05
-0,380037546	-6,27E-05
-0,365023851	-2,10E-05
-0,350037813	-2,92E-05
-0,33503592	-5,84E-05
-0,320018411	-5,16E-05
-0,30500865	-1,85E-05
-0,290034413	-2,38E-05
-0,275048375	-4,61E-05
-0,260003209	-4,76E-05
-0,245080233	-1,38E-05
-0,230035067	-2,15E-05
-0,21506083	-4,45E-05
-0,200023532	-4,25E-05
-0,1849823	-1,24E-05

-0,169988275	-1,83E-05
-0,154966831	-4,13E-05
-0,139779568	-3,52E-05
-0,124955297	-1,11E-05
-0,109945536	-2,10E-05
-0,094947696	-4,00E-05
-0,079973459	-3,25E-05
-0,064991355	-1,17E-05
-0,049965858	-3,20E-05
-0,034968019	-3,67E-05
-0,01966238	-1,02E-05
-0,004976153	-1,30E-05
0,010013461	-2,89E-05
0,025050402	-3,07E-05
0,040067673	-6,30E-06
0,054970622	-1,04E-07
0,07006669	-3,09E-05
0,085312724	-1,66E-05
0,100042105	-5,80E-06
0,114988327	2,80E-07
0,130037189	-2,77E-05
0,145137191	-1,75E-05
0,160055876	-5,72E-06
0,17489171	4,10E-07
0,190279722	-2,22E-05
0,205226064	-8,09E-06
0,220689058	-9,95E-06
0,235035658	-1,21E-07
0,250064731	-2,10E-05
0,265180707	-6,93E-06
0,280675173	-6,75E-06
0,295996189	9,76E-07
0,310232401	-1,58E-05
0,325107694	-4,11E-06
0,340775847	-6,00E-06
0,355828643	1,43E-06
0,370344877	-1,44E-05
0,38513732	-5,87E-06
0,400576591	-2,65E-06
0,41592133	-8,73E-06
0,430816293	3,23E-08
0,445206404	-4,26E-06
0,460554957	1,72E-06
0,475741863	-3,34E-06
0,490699887	-6,71E-06
0,505409479	-5,24E-06
0,520497799	4,29E-06
0,535570264	-9,50E-06
0,550658464	8,30E-07
0,56555748	1,46E-07
0,580207825	3,60E-06
0,595197558	-2,85E-09

0,610210776	5,01E-06
0,625208378	6,98E-07
0,64020586	2,00E-05
0,655227065	1,97E-05
0,670220733	1,96E-05
0,685245872	2,69E-05
0,700247288	3,21E-05
0,715244889	3,44E-05
0,730246305	3,69E-05
0,745220184	4,40E-05
0,760190129	5,25E-05
0,775238991	5,67E-05
0,790268064	6,19E-05
0,805245876	7,12E-05
0,820259213	8,25E-05
0,835237026	9,11E-05
0,850273967	9,96E-05
0,865291238	0,000111227
0,880304575	0,000127292
0,895298123	0,000139944
0,910299659	0,000155253
0,925277472	0,00017408
0,940278888	0,000192924
0,955268621	0,000211188
0,970258236	0,000234079
0,985291243	0,000258641
1,000300646	0,000284445

Lampiran 22: Kurva Karakteristik I-V Terang untuk 10% Graphene



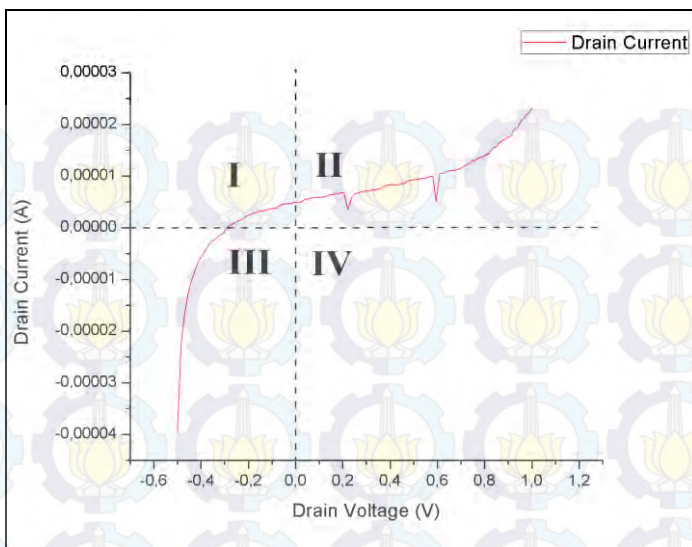
Lampiran 23: Tabel Karakteristik I-V Gelap untuk 15% Graphene

Drain Voltage	Drain Current
-0,500151873	-3,96E-05
-0,485082865	-2,28E-05
-0,470136166	-1,66E-05
-0,455142021	-1,29E-05
-0,440112472	-1,02E-05
-0,425110459	-8,14E-06
-0,410116434	-6,43E-06
-0,39507103	-5,28E-06
-0,380041361	-4,07E-06
-0,364988208	-3,22E-06
-0,349769235	-2,56E-06
-0,334877729	-2,01E-06
-0,319998026	-1,29E-06
-0,305007815	-9,20E-07
-0,289978266	1,65E-07
-0,275019646	5,65E-07
-0,260001898	8,66E-07
-0,245011806	1,32E-06
-0,229986191	1,53E-06
-0,214968443	2,14E-06
-0,199966431	2,50E-06
-0,184968352	2,72E-06

-0,169942737	2,95E-06
-0,154924989	3,13E-06
-0,139911175	3,34E-06
-0,124932885	3,33E-06
-0,109907269	3,66E-06
-0,094920993	3,77E-06
-0,079926968	3,85E-06
-0,064936757	4,54E-06
-0,049903274	4,59E-06
-0,03494072	4,75E-06
-0,019903302	4,66E-06
-0,00493288	5,02E-06
0,010045171	4,87E-06
0,025030971	5,11E-06
0,040135145	5,54E-06
0,055105209	5,62E-06
0,070098996	5,82E-06
0,085108519	5,87E-06
0,100090504	5,87E-06
0,11510396	5,95E-06
0,130097628	6,02E-06
0,145091414	6,38E-06
0,160057545	6,43E-06
0,175102592	6,68E-06
0,190048933	6,78E-06
0,20507431	6,80E-06
0,220091701	3,50E-06
0,235136747	5,74E-06
0,25017786	6,47E-06
0,265155792	6,78E-06
0,280169249	7,06E-06
0,295166969	7,13E-06
0,310148835	7,10E-06
0,32515049	7,26E-06
0,340148211	7,36E-06
0,355141997	7,56E-06
0,370159388	7,87E-06
0,385172844	8,22E-06
0,400170565	8,32E-06
0,415148497	8,33E-06
0,430165887	8,29E-06
0,445222735	8,51E-06
0,460232258	8,59E-06
0,475194454	9,17E-06
0,490215898	9,26E-06
0,505197763	9,33E-06
0,520207286	9,42E-06
0,53517735	9,56E-06
0,550186872	9,58E-06
0,565153003	9,96E-06
0,580174446	9,91E-06
0,595160246	5,09E-06

0,610154033	1,06E-05
0,625120163	1,06E-05
0,640145421	1,10E-05
0,655206323	1,11E-05
0,670231581	1,12E-05
0,685213447	1,13E-05
0,700230956	1,16E-05
0,715177298	1,21E-05
0,730194688	1,23E-05
0,745172739	1,30E-05
0,760201931	1,31E-05
0,775183916	1,36E-05
0,790197372	1,37E-05
0,805222631	1,42E-05
0,820232153	1,45E-05
0,835194349	1,54E-05
0,850247264	1,58E-05
0,865264654	1,65E-05
0,880158663	1,71E-05
0,895155549	1,75E-05
0,910152316	1,78E-05
0,925113678	1,90E-05
0,940134287	1,95E-05
0,955146909	2,07E-05
0,970151663	2,13E-05
0,985132694	2,23E-05
1,000113845	2,32E-05

Lampiran 24: Kurva Karakteristik I-V Gelap untuk 15% Graphene



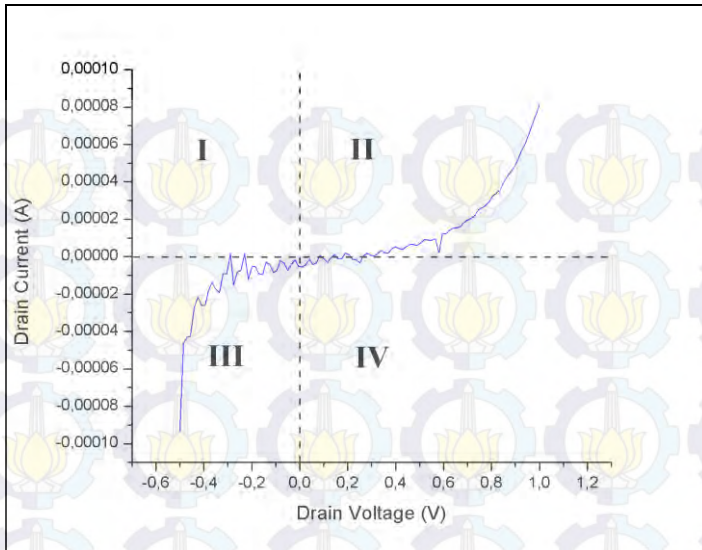
Lampiran 25: Tabel Karakteristik I-V Terang untuk 15% Graphene

Drain Voltage	Drain Current
-0,500153899	-9,32E-05
-0,485116839	-4,60E-05
-0,470158696	-4,31E-05
-0,45514524	-4,24E-05
-0,440120101	-2,78E-05
-0,425177693	-2,15E-05
-0,410140634	-2,60E-05
-0,395138979	-2,61E-05
-0,380078316	-1,82E-05
-0,36509645	-1,36E-05
-0,350090981	-1,74E-05
-0,335093379	-1,93E-05
-0,320072055	-9,16E-06
-0,305070519	-9,35E-06
-0,289903283	1,61E-06
-0,275075197	-1,51E-05
-0,260144711	-8,26E-06
-0,245032668	-7,21E-06
-0,229940414	1,64E-06
-0,215049267	-1,22E-05
-0,200055599	-5,40E-06
-0,185022473	-5,22E-06
-0,169843435	-8,98E-06

-0,154411912	-9,75E-06
-0,139733791	-2,87E-06
-0,124858379	-4,27E-06
-0,10985291	-8,58E-06
-0,09481585	-7,25E-06
-0,079924703	-2,06E-06
-0,064714074	-3,53E-06
-0,049471974	-7,23E-06
-0,034801722	-3,90E-06
-0,019729137	-1,73E-06
-0,00481832	-5,09E-06
0,01027751	-5,68E-06
0,025136828	-4,33E-06
0,040315509	-1,37E-06
0,055368066	-4,30E-06
0,070235133	-3,18E-06
0,085181117	4,54E-07
0,100241542	-1,14E-06
0,115388632	-3,23E-06
0,130105853	-5,52E-07
0,145012498	9,77E-07
0,160183311	-1,19E-06
0,175259471	-1,06E-06
0,190173864	1,91E-06
0,205179095	1,18E-06
0,22029078	-1,50E-06
0,235244632	-1,66E-06
0,25025773	-3,26E-06
0,265258908	1,38E-07
0,280268073	1,90E-06
0,295198321	8,83E-07
0,310341477	2,92E-07
0,325216532	1,46E-06
0,340245366	3,38E-06
0,355301738	2,15E-06
0,370283246	1,89E-06
0,385252953	4,50E-06
0,400230527	5,24E-06
0,415302753	4,26E-06
0,430307865	4,06E-06
0,445218444	5,25E-06
0,460263014	6,73E-06
0,475280046	6,54E-06
0,490312815	5,92E-06
0,505345583	7,57E-06
0,520236373	9,07E-06
0,535217881	8,98E-06
0,550266385	8,79E-06
0,565105915	9,70E-06
0,580134749	1,78E-06
0,595104456	1,21E-05
0,6101017	1,20E-05

0,625138402	1,41E-05
0,640127778	1,53E-05
0,655152678	1,54E-05
0,670149922	1,63E-05
0,685151219	1,82E-05
0,700144529	1,96E-05
0,715161562	2,04E-05
0,73014307	2,22E-05
0,745152116	2,50E-05
0,760145545	2,60E-05
0,775162458	2,73E-05
0,790159822	2,94E-05
0,805121541	3,25E-05
0,8201859	3,38E-05
0,835194945	3,57E-05
0,85017252	3,96E-05
0,865150094	4,27E-05
0,880210519	4,54E-05
0,895235419	4,79E-05
0,910212994	5,19E-05
0,925182581	5,67E-05
0,940168023	6,01E-05
0,955181122	6,52E-05
0,970209956	7,08E-05
0,985179663	7,59E-05
1,000208497	8,17E-05

Lampiran 26: Kurva Karakteristik I-V Terang untuk 15% Graphene



Lampiran 27: ICDD 01-070-7348

Name and formula

Reference code: 01-070-7348

Mineral name: Anatase
Compound name: Titanium Oxide

Empirical formula: O_2Ti
Chemical formula: TiO_2

Crystallographic parameters

Crystal system: Tetragonal
Space group: $I4_1/amd$
Space group number: 141

a (Å): 3.7640
b (Å): 3.7640
c (Å): 9.5000
Alpha (°): 90.0000
Beta (°): 90.0000
Gamma (°): 90.0000

Volume of cell (10^6 pm^3): 136.03
Z: 4.00

RIR: 4.95

Status, subfiles and quality

Status: Alternate Pattern
Subfiles: Alloy, metal or intermetallic
Common Phase
Excipient
Forensic
ICSD Pattern
Inorganic
Mineral
Pharmaceutical
Pigment/Dye
Star (S)

Quality:

Comments

ANX: AX2
Creation Date: 11/20/2008
Modification Date: 1/19/2011
ANX: AX2
Analysis: O2 Ti1
Formula from original source: Ti O2
ICSD Collection Code: 093098
Calculated Pattern Original Remarks: From rutile/anatase mixture
Stable below 300 K (2nd ref., Tomaszewski), 300-800 K: Pbca
Wyckoff Sequence: e a(41/AMDZ)
Unit Cell Data Source: Powder Diffraction

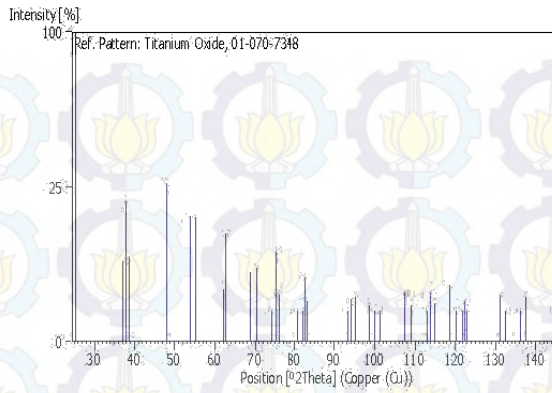
References

Primary reference: *Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure: Ballirano, P., Caminiti, R., *J. Appl. Crystallogr.*, **34**, 757, (2001)

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta [deg]	I (%)
1	1	0	1	3.51540	25.315	100.0
2	1	0	3	2.42850	36.986	6.6
3	0	0	4	2.37500	37.851	20.3
4	1	1	2	2.33130	38.588	7.4
5	2	0	0	1.89200	48.050	26.5
6	1	0	5	1.69800	53.956	16.3
7	2	1	1	1.66600	55.080	16.1
8	2	1	3	1.49250	62.144	2.8
9	2	0	4	1.47980	62.797	12.1
10	1	1	6	1.36260	68.849	5.0
11	2	2	0	1.33780	70.311	5.6
12	1	0	7	1.27750	74.166	0.5
13	2	1	5	1.26370	75.115	8.3
14	3	0	1	1.25040	76.055	2.3
15	0	0	8	1.18750	80.883	0.4
16	3	0	3	1.17180	82.198	0.6
17	2	2	4	1.16560	82.731	4.2
18	3	1	2	1.16040	83.184	1.7
19	2	1	7	1.05870	93.370	0.5
20	3	0	5	1.05080	94.287	1.9
21	3	2	1	1.04320	95.191	2.1
22	1	0	9	1.01670	98.514	1.4
23	2	0	8	1.00580	99.967	0.9
24	3	2	3	0.99620	101.291	0.7
25	3	1	6	0.95460	107.595	2.5
26	4	0	0	0.94600	109.031	1.4
27	3	0	7	0.92390	112.971	0.2
28	3	2	5	0.91870	113.957	2.5
29	4	1	1	0.91350	114.968	1.5
30	1	1	10	0.89520	118.741	3.3
31	2	1	9	0.89520	118.741	3.3
32	2	2	8	0.88810	120.306	0.7
33	4	1	3	0.88150	121.819	0.6
34	4	0	4	0.87880	122.455	1.7
35	3	3	2	0.87660	122.981	0.4
36	4	2	0	0.84610	131.125	2.2
37	1	0	11	0.84200	132.368	0.4
38	3	2	7	0.83020	136.204	0.4
39	4	1	5	0.82640	137.534	2.1
40	3	0	9	0.80950	144.193	0.9

Stick Pattern





BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Indera Cahya Pradana lahir di kota Magelang, tanggal 30 September 1993 merupakan putra pertama dari dua bersaudara Bapak Ketut Prasetyo dan Ibu Umi Fauzia. Penulis menempuh pendidikan

formalnya di SDN Pekuncen Pasuruan, SMPN 2 Pasuruan, SMAN 1 Pasuruan dan SMAN 16 Surabaya. Pada tahun 2011, setelah lulus dari SMA, penulis mengikuti ujian tulis Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan diterima di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ITS.

Prestasi terbaik yang pernah dicapai penulis adalah mempresentasikan paper yang ditulisnya dalam “ASEAN Academic Society International Conference 2013”. Penulis mengakhiri studi S1-nya dengan mengerjakan Tugas Akhir: Analisa Pengaruh Komposisi *Graphene*- TiO_2 Terhadap Unjuk Kerja *Dye-sensitized Solar Cell* (DSSC). Penulis dapat dihubungi melalui alamat e-mail dan nomor telepon: inderacahyapradana@gmail.com dan +6287853367785.